



Anwendung von multikriteriellen Entscheidungsmethoden im Nachhaltigen Bauen

Verfasser:

Dipl.-Ing. Marco Scherz, BSc

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmuth Kreiner

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Passer, MSc



Dipl.-Ing. Marco Scherz, BSc

Anwendung von multikriteriellen Entscheidungsmethoden im Nachhaltigen Bauen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmuth Kreiner
Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Passer, MSc

Arbeitsgruppe Nachhaltiges Bauen
Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie

Graz, September 2019

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, 5. September 2019

Marco Scherz

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 5. September 2019

Marco Scherz

Gleichheitsgrundsatz

Hinweis im Sinne des Gleichbehandlungsgesetzes

In der vorliegenden Masterarbeit wird aus Gründen der leichteren Lesbarkeit auf eine geschlechterspezifische Differenzierung verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung für beide Geschlechter.

Vorwort und Danksagung

Mein Interesse für den Themenbereich Nachhaltiges Bauen wurde bereits im Zuge des Studiums und in weiterer Folge durch meine erste Masterarbeit *Umsetzung nachhaltigen Bauens - eine empirische Situationsanalyse* geweckt. Umso dankbarer bin ich Alexander Passer und Helmuth Kreiner, dass ich nach Abschluss meines Diploms ein Teil der Arbeitsgruppe *Nachhaltiges Bauen* des Instituts für Materialprüfung und Baustofftechnologie werden durfte. Ich hoffe, dass ich mich noch einige Jahre mit den interessanten Forschungsfeldern der Arbeitsgruppe, auch im Zuge meiner Dissertation, weiter beruflich beschäftigen darf.

Für die umfangreiche Betreuung der vorliegenden Masterarbeit möchte ich mich nochmals bei Helmuth und Alexander für ihre zahlreichen investierten Stunden in Gespräche und Diskussionen sowie für das Einbringen ihrer Ideen und Inputs bedanken. Besonderer Dank gebührt meiner Lebensgefährtin, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite stand sowie meinen Eltern, welche es durch ihre finanzielle Unterstützung möglich gemacht haben, den Weg einer wissenschaftlichen Karriere einzuschlagen.

Kurzfassung

Die Masterarbeit widmet sich dem Themenbereich der multikriteriellen Entscheidungsmethoden. Das Verständnis über die Auswirkungen der Änderungen eines Faktors auf mehr als vier zusammenhängende, sich beeinflussende, Faktoren ist für das menschliche Gehirn nicht mehr abschätzbar. Vor allem mittel- bzw. langfristige Auswirkungen können bei dieser Anzahl von in Beziehung stehenden Faktoren ohne Hilfsmittel nicht mehr bewertet werden.

Neben den umfangreichen baurechtlichen Anforderungen stellen die zunehmenden Anforderungen aus Sicht der Nachhaltigkeit den Planungsprozess sowie in weiterer Folge die Entscheidungsfindung im Rahmen des Planungsprozesses eines Gebäudes vor komplexe Herausforderungen. Dies beruht vor allem auf den inhärenten Zielkonflikten zwischen soziokulturellen, ökologischen und ökonomischen Faktoren.

Seit den 1970er Jahren hat die Erforschung und Entwicklung zum Themenbereich der multikriteriellen Entscheidungsmethoden (MCDM – Methoden) stark zugenommen. Auf dem Gebiet des Bauingenieurwesens wurden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche MCDM - Methoden erfolgreich angewandt. Dabei erwiesen sich diese Methoden als hilfreiche Werkzeuge für Projektmanager zur Lösung von Entscheidungsproblemen in Bauprojekten. Die Operationalisierung einer integralen Gebäudequalität wird durch multikriterielle Anforderungen bei der Errichtung nachhaltiger Gebäude zunehmend anspruchsvoller. Neben den präzisen Anforderungen der Stakeholder erfordert die Implementierung von Nachhaltigkeitsaspekten in die Baupraxis einen integralen und lebenszyklusorientierten Ansatz in der frühen Planungsphase.

In der Masterarbeit werden ausgewählte MCDM – Methoden für deren Einsatz in der frühen Planungsphase von Gebäuden analysiert und für die Anwendung im Nachhaltigen Bauen vergleichend bewertet.

Abstract

The master thesis is dedicated to the topic of multi-criteria decision making methods. For humans the understanding of how a factor changes to more than four interrelated, influencing factors is quite difficult to grasp. Especially medium and long-term effects can no longer be assessed without tools with regard to this amount of related factors.

In addition to the extensive building law requirements, the increasing requirements from the perspective of sustainability lead to complex challenges for the planning process and, subsequently, for decision-making within the planning process of a building. This is mainly due to the inherent trade-offs between socio-cultural, environmental and economic factors.

Since the 1970s, research and development in the field of multi-criteria decision-making methods (MCDM) has increased significantly. In the field of civil engineering, numerous MCDM methods have been successfully applied in recent decades. These methods proved to be helpful tools for project managers to solve decision problems in construction projects. The operationalization of building quality is becoming increasingly demanding due to multi-criteria requirements in the construction of sustainable buildings. In addition to the precise requirements of stakeholders, the implementation of sustainability aspects in construction practice requires an integral and life cycle-oriented approach in the early design stage.

In the master thesis, selected MCDM methods are analysed in the context of the early design stage of buildings and evaluated for application in sustainable construction.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	9
Kurzfassung	11
Abstract	13
1 Einleitung	19
1.1 Problemstellung	22
1.2 Ziel der Arbeit	23
1.2.1 Forschungsfragen	24
1.2.2 Hypothese	24
1.3 Aufbau der Arbeit	25
2 Umsetzung nachhaltigen Bauens	27
2.1 Nachhaltige Entwicklung	28
2.2 Dimensionen der Nachhaltigkeit	29
2.3 Bedeutung des Nachhaltigkeitsbegriff im Bauwesen	30
3 Systemwissenschaften, Komplexitätsmanagement und Entscheidungstheorie	33
3.1 Allgemeine Systemtheorie	34
3.2 Kybernetik	37
3.3 Systems Engineering	38
3.4 Komplexität	42
3.4.1 Abgrenzung zur Kompliziertheit	43
3.4.2 Was ist ein komplexes System	44
3.4.3 Umgang mit komplexen Systemen	45
3.5 Komplexitätsmanagement im Bauwesen	47
3.6 Entscheidungsprozess	51
3.7 Entscheidungsproblem in der frühen Planungsphase von Gebäuden	54

4	Multikriterielle Entscheidungsmethoden	57
4.1	Einteilung von MCDM - Methoden	57
4.2	Typen von Entscheidungsproblemen	59
4.3	Anwendung multikriterieller Entscheidungsmethoden in der Baubranche	61
5	Systematische Literaturrecherche	67
5.1	Auswahl der Keywords	67
5.2	Literatur zu multikriteriellen Entscheidungsmethoden	68
5.2.1	Analytic Hierarchy Process (AHP)	70
5.2.2	Analytic Network Process (ANP)	70
5.2.3	Complex proportional assessment (COPRAS)	71
5.2.4	Elimination et choix traduisant la réalité (ELECTRE)	72
5.2.5	Multiplicative exponential weighting (MEW)	73
5.2.6	Preference ranking organization method for enrichment of evaluations (PROMETHEE)	73
5.2.7	Simple Additive Weighting (SAW)	75
5.2.8	Superiority and Inferiority Ranking (SIR)	75
5.2.9	Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)	76
5.2.10	Utilités additives (UTA)	77
5.2.11	Visekriterijumska Optimizacija I kompromiso resenje (VIKOR)	78
6	Anwendung multikriterieller Entscheidungsmethoden	81
6.1	Analytic Hierarchy Process	81
6.1.1	Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle	83
6.1.2	Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle mit der Software Super-Decision	88
6.1.3	Fazit zur Anwendung von AHP	91
6.2	Analytic Network Process	93
6.2.1	Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle	94
6.2.2	Fazit zur Anwendung von ANP	98
6.3	Complex proportional assessment	100
6.3.1	Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle	100
6.3.2	Fazit zur Anwendung von COPRAS	103
6.4	Elimination et choix traduisant la réalité	104
6.4.1	Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle	105
6.4.2	Fazit zur Anwendung von ELECTRE	108
6.5	Multiplicative exponential weighting	110
6.5.1	Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle	110

6.5.2	Fazit zur Anwendung von MEW	111
6.6	Preference ranking organization method for enrichment of evaluations	113
6.6.1	Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle	113
6.6.2	Fazit zur Anwendung von PROMETHEE	118
6.7	Simple Additive Weighting	120
6.7.1	Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle	120
6.7.2	Fazit zur Anwendung von SAW	122
6.8	Superiority and Inferiority Ranking	123
6.8.1	Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle	123
6.8.2	Fazit zur Anwendung von SIR	125
6.9	Technique for order of preference by similarity to ideal solution	127
6.9.1	Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle	128
6.9.2	Fazit zur Anwendung von TOPSIS	129
6.10	Utilités additives	131
6.10.1	Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle	132
6.10.2	Fazit zur Anwendung von UTA	137
6.11	Visekriterijumska Optimizacija I kompromisno resenje	138
6.11.1	Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle	138
6.11.2	Fazit zur Anwendung von VIKOR	140
7	Zusammenfassung und Ausblick	143
7.1	Zusammenfassung	143
7.2	Beantwortung der Forschungsfragen und Verifizieren der Hypothese	151
7.3	Ausblick und zukünftige Forschungsfragen	158
7.3.1	Ausblick	158
7.3.2	Zukünftige Forschungsfragen	161
	Literaturverzeichnis	163
	Abbildungsverzeichnis	180
	Tabellenverzeichnis	183

1 Einleitung

Die nachfolgende Masterarbeit widmet sich dem Themenbereich „Anwendung multikriterieller Entscheidungsmethoden im Nachhaltigen Bauen“. Das Verständnis über die Auswirkungen der Änderungen eines Faktors auf mehr als vier zusammenhängende, sich beeinflussende Faktoren ist für das menschliche Gehirn nicht mehr abschätzbar [Halford2005]. Vor allem mittel- bzw. langfristige Auswirkungen können bei dieser Anzahl von in Beziehung stehenden Faktoren ohne Hilfsmittel nicht mehr bewertet werden. Bauprojekte übersteigen diese Anzahl an sich beeinflussenden Kriterien um eine Vielzahl. Durch die Unikatstellung jedes einzelnen Bauwerks ist eine Planung nach immer wiederkehrenden Abläufen und Prozessen nicht umsetzbar. Neben der ohnehin durch statische und bauphysikalische Anforderungen gegebenen Komplexität eines Gebäudes wird der Planungsprozess durch Anforderungen an die Nachhaltigkeit erhöht. Beispielhaft seien die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit – die ökologische Dimension, die ökonomische Dimension und die soziale Dimension – sowie die durch das europäische Rahmenwerk des CEN/TC350 [CEN/TC350] zusätzlichen funktionalen und technischen Anforderungen genannt. Diese Kategorien unterteilen sich in unzählige Untieranforderungen, welche wiederum in einem vernetzten Zusammenhang stehen. Diese Untieranforderungen werden in unterschiedlicher Intensität – im Sinne der Umsetzung nachhaltigen Bauens - an jedes Bauvorhaben gestellt. Aufgrund der multikriteriellen Zusammenhänge der Nachhaltigkeitskriterien kann eine ganzheitliche Berücksichtigung ausschließlich durch einen vollständigen Kriteriensatz erfolgen [Passer2009]. Zahlreiche Gebäudezertifizierungssysteme (BREAAAM¹, LEED², DGNB³ etc.) haben bereits vollständige Kriterienkataloge zur Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden entwickelt und sind für die Bewertung der Gebäudeperformance geeignet [Passer2007]. Großteils finden diese Bewertungen jedoch nach Abschluss der Bauvorhaben statt. In der vorliegenden Masterarbeit werden multikriterielle Entscheidungsmethoden analysiert, um diesen Bewertungsprozess in der frühen Planungsphase – in welcher zahlreiche nicht quantifizierbare Faktoren vorhanden sind - zu erleichtern und somit voranzutreiben.

¹<http://www.breeam.com>, Zugriff am 08.08.19

²<https://www.usgbc.org/leed>, Zugriff am 08.08.19

³<http://www.dgnb-system.de/de/system/zertifizierungssystem/>, Zugriff am 08.08.19

Seit den 1970er Jahren hat die Literatur zu multikriteriellen Entscheidungsmethoden (MCDM - Methoden) enorm zugenommen [**Wallenius2008**]. MCDM – Methoden sind eine effektive Methode um Entscheidungsprobleme mit zahlreichen Stakeholdern, zahlreichen Zielen und zahlreichen Kriterien zu bewältigen. Dazu müssen die Stakeholder jedoch einige Teilaspekte erarbeiten, um diese Methoden anzuwenden. Unter diese Teilaspekte fallen die Festlegung der Ziele, die Evaluierung der Menge der Alternativen und Kriterien, die Angabe von Leistungswerten zu Kriterien, die Gewichtung der Kriterien und in manchen Methoden die Reihung der Alternativen [**VanderHove2006**].

Auf dem Gebiet des Bauingenieurwesens wurde eine große Anzahl von MCDM - Methoden eingeführt, die einen unterschiedlichen theoretischen Hintergrund, eine unterschiedliche Art von gestellten Fragen, eine unterschiedlich große Bandbreite von benötigten Datentypen und unterschiedliche Arten der ausgegebenen Ergebnisse umfassen. Dabei erwiesen sich MCDM - Methoden als hilfreiche Werkzeuge für Projektmanager zur Überwindung von Entscheidungsproblemen in Bauprojekten [**Abdel2017**]. Der Zweck von MCDM - Methoden besteht nicht immer darin, die richtige Entscheidung herauszugreifen, sondern dazu beizutragen das Verständnis auf eine Weise zu verbessern, die einen Entscheidungsprozess mit mehreren Kriterien mit Unsicherheiten behafteten Leistungswerten und widersprechenden Interessen erleichtert. MCDM - Methoden visualisieren Zielkonflikte zwischen mehreren widersprüchlichen Kriterien und quantifizieren die Unsicherheiten, die für einen Vergleich verfügbarer Alternativen erforderlich sind [**Kiker2005**]. Viele MCDM - Methoden teilen ähnliche Ablaufschritte bei der Konstruktion der Entscheidungsmatrix. Jede MCDM – Methode benötigt Informationen zur Generierung einer vollständigen Entscheidungsmatrix und ordnet in weiterer Folge die Alternativen auf unterschiedliche Weise ein [**Yoe2002**].

Die Hauptelemente einer MCDM – Methode umfassen:

- Ein bzw. mehrere Ziel(e)
- Alternativen
- Kriterien, anhand derer die Alternativen bewertet werden
- Leistungswerte, die den Wert der erwarteten Leistung einer Alternative in Bezug auf die Kriterien widerspiegeln und
- Kriteriengewichte, die die relative Wichtigkeit jedes einzelnen Kriteriums im Vergleich zu anderen Kriterien wiedergeben

Entscheidungsfindung in Bauprojekten mit dem Fokus auf die Umsetzung von Nachhaltigkeitsprinzipien kann komplex und scheinbar unlösbar sein. Dies beruht vor allem auf den inhärenten Zielkonflikten zwischen soziokulturellen, ökologischen und ökonomischen Faktoren. Viele Subkriterien dieser Faktoren können nicht leicht in einen Geldwert umgerechnet werden, teilweise weil umweltbezogene Indikatoren oft ethische und moralische Prinzipien beinhalten, die nicht mit einem wirtschaftlichen Nutzen oder Wert bezifferbar sind. Bei der Konfrontation mit solchen Problemen versuchen die meisten Menschen intuitive oder heuristische Ansätze zu verwenden, um die Komplexität beherrschbar zu machen. Dabei können wichtige Informationen verloren gehen, gegensätzliche Standpunkte können verworfen und Unsicherheiten ignoriert werden [Kiker2005]. Bei der Entscheidungsfindung bei komplexen Entscheidungsproblemen mit konfrontativen Faktoren sollte sich nicht auf das Trial and Error – Prinzip und traditionelle Erfahrungen verlassen werden.

MCDM – Methoden sind ein leistungsfähiges Werkzeug zur Konfliktbewältigung und wurden in der Forschung bereits intensiv zur Bewertung der Nachhaltigkeit eingesetzt [Munda2005], [Huang2011], [Akadiri2012], [Rowley2012], [Herva2013], [Dalal2002], [Morrissey2004]. Unabhängig davon, welches analytische Entscheidungsinstrument ausgewählt wird, erfordert die Implementierung oft unmögliche Kompromisse. Diese oftmals aufwendige Kompromisslösung zwischen beteiligten Stakeholdern ist einer der Hauptgründe, warum MCDM - Methoden in der praktischen Anwendungen noch nicht weit verbreitet sind [Kiker2005].

1.1 Problemstellung

Die Denkweise in einfachen logischen Schlüssen und Zusammenhängen führt oftmals zum Übersehen mittel- oder langfristiger Auswirkungen auf unsere unmittelbare Umgebung und Umwelt. Entgegen der Zielsetzung einer nachhaltigen Entwicklung werden dadurch zukünftige Generationen gefährdet [Brundlandt1987]. Um mit komplexen Systemen und der damit verbundenen Eigendynamik der Systeme umzugehen, ist eine vernetzte Denkweise unabdingbar. Ein Grund für die eingeschränkte Denkweise ist, dass das Lösen von auftretenden Problemen bzw. Konflikten direkt an Ort und Stelle des Auftretens wesentlich einfacher ist, als der Blick über den Tellerrand hinaus. Das Unberücksichtiglassen der Systemzusammenhänge führt meist dazu weitere Probleme zu schaffen. Diese meist indirekten Wirkungen treten oftmals mit einer Zeitverzögerung auf und sind nicht den Entscheidungen heutiger Generationen geschuldet. Bei komplexen Systemen folgen die Auswirkungen - wie z.B. der Treibhauseffekt - nicht unmittelbar auf die Ursachen und hängen meist nur indirekt mit diesen zusammen. Daher wird von Entscheidungsträgern der unmittelbare Handlungsbedarf oftmals nicht wahrgenommen. Die drastische Situation des Klimawandels sowie die vermehrte Anzahl von Stürmen, Überschwemmungen, Trockenheiten und Waldbränden ist somit vielmehr auf das Handeln der Menschheit in den siebziger Jahren zurückzuführen [Vester2008]. Darauf zurückführend stellen Klima- und Katastrophenschutz zunehmend immer komplexer werdende Herausforderungen für Architekten und Ingenieure dar. Nachhaltiges Bauen steht als Schlagwort im Mittelpunkt dieser Entwicklung.

Aufgrund der multikriteriellen Anforderungen im Nachhaltigen Bauen steigt die Komplexität im Entscheidungsprozess in der frühen Planungsphase von Gebäuden. Die Operationalisierung der integralen Gebäudeleistung wird durch multikriterienbezogene Entscheidungsprozesse bei der Errichtung nachhaltiger Gebäude zunehmend anspruchsvoller. Neben den präzisen Anforderungen der Stakeholder erfordert die Implementierung von Nachhaltigkeitsaspekten in der aktuellen Baupraxis einen integralen und lebenszyklusorientierten Ansatz. Die derzeitigen Herausforderungen bei der Operationalisierung von ganzheitlichen Planungs- und Bauprozessen beruhen vor allem auf unpräzisen Stakeholderanforderungen und dem derzeitigen Mangel an geeigneten Methoden für die Steuerung von Lebenszyklusprozessen. In weiterer Folge kann ein begrenztes Bewusstsein für systemische Effekte zu unpräzisen und/oder falschen Entscheidungen in der frühen Planungsphase führen.

Die Umsetzung nachhaltigen Bauens ist ein multidimensionales Konzept, das in allen Bereichen der Gesellschaft an Relevanz gewinnt [Gervasio2012]. *Barbier* stellt fest, dass nachhaltige Entwicklung die gleichzeitige Maximierung ökologischer, ökonomischer und sozialer Systemziele

beinhaltet [**Barbier1987**]. Wie jedoch von *Munda* aufgezeigt wurde, ist es im Allgemeinen nicht möglich, gleichzeitig verschiedene Ziele zu maximieren. Daher sollte ein Kompromiss zwischen verschiedenen Zielen gefunden werden, was durch die Anwendung von multikriteriellen Entscheidungsmethoden erreicht werden kann [**Munda2005**]. Ein großer Kritikpunkt bei der Anwendung von multikriteriellen Entscheidungsmethoden ist, dass unterschiedliche Methoden für gleiche Anwendungsprobleme unterschiedliche Ergebnisse liefern können [**Zanakis1998**], [**Gershon1983**]. Nach *Voogd* treten in mindestens 40 Prozent von Entscheidungsproblemen unterschiedliche Ergebnisse mit unterschiedlichen Methoden auf [**Voogd1983**].

Die Wichtigkeit multikriterielle Entscheidungsmethoden vor ihrer Anwendung zu vergleichen wurde bereits von *MacCrimmon* im Jahre 1973 festgeschrieben [**MacCrimmon1973**]. Neben der Anwendungsanalyse von MCDM – Methoden wurden in der Literatur auch zahlreiche Vergleiche von MCDM - Methoden in unterschiedlichsten Bereichen der Bauindustrie vorgestellt [**Zanakis1998**], [**Salminen1998**], [**Opricovic2004**], [**Parkan2000**]. Weitere Autoren wie *Ozernoy*, *Hwang & Yoon* oder *Hobbs* haben zur Auswahl der richtigen multikriteriellen Entscheidungsmethode bereits Ansätze skizziert [**Ozernoy1987**], [**Hwang1981**], [**Hobbs1992**]. Ein häufiges Problem bei der überwiegenden Mehrheit dieser Studien ist die Tatsache, dass die meisten von ihnen keine eindeutige Begründung für die Auswahl einer Methode vorlegten.

Aus diesem Grund werden im empirischen Teil der vorliegenden Masterarbeit ausgewählte multikriterielle Entscheidungsmethoden auf Basis desselben Entscheidungsproblems (Planung der Gebäudehülle) verglichen und die Anwendung einer MCDM – Methode für die frühe Planungsphase von Gebäuden vorgeschlagen. Die Anwendung einer MCDM - Methode soll dabei den Planer unterstützen, in einem geringen Zeitaufwand die für den Entscheidungsträger - aus Sicht der Nachhaltigkeit - beste Planungsvariante zu identifizieren.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, durch die kritische Analyse der ausgewählten multikriteriellen Entscheidungsmethoden deren Unterschiede darzustellen und eine Empfehlung zur Anwendung einer geeigneten Methode für eine Entscheidungsfindung im frühen Planungsprozess von Gebäuden zu geben. Weiters werden die benannten Methoden im Hinblick auf die Anwendbarkeit im Planungsprozess untersucht, indem die gewählten Methoden an einem Entscheidungsproblem modelliert und angewandt werden. Dabei werden Vor- und Nachteile der einzelnen Entscheidungsmethoden aufgezeigt. Die Handhabbarkeit der Komplexität in der Entscheidungs-

findung durch die Anwendung von multikriteriellen Entscheidungsmethoden soll die praktische Umsetzung von Nachhaltigkeitsaspekten erleichtern und damit Nachhaltiges Bauen forcieren.

1.2.1 Forschungsfragen

Für die vorliegende Masterarbeit ergeben sich daher folgende Forschungsfragen:

- Was ist der Stand der Forschung in Bezug auf multikriterielle Entscheidungsmethoden in der Baubranche?
- Für welche Bereiche in der Baubranche werden multikriterielle Entscheidungsmethoden bereits angewendet?
- Ändert sich die Entscheidung bei der Anwendung unterschiedlicher multikriterieller Entscheidungsmethoden für das gleiche Entscheidungsproblem?
- Sind freizugängliche Softwaretools (Freeware) für die betrachteten multikriteriellen Entscheidungsmethoden verfügbar?

1.2.2 Hypothese

Auf Basis der Forschungsfragen und des allgemeinen Forschungsinteresses wird folgende Hypothese aufgestellt, die mit dieser Arbeit verifiziert werden soll:

Multikriterielle Entscheidungsmethoden werden in der Baubranche bereits angewendet und können auch in der Projektphase der frühen Planungsphase von Gebäuden die Entscheidungsträger bei der Berücksichtigung von komplexen Anforderungen unterstützen. Dabei spielt es für die Lösung des Entscheidungsproblems keine Rolle, welche der in den letzten Jahrzehnten entwickelten, unterschiedlichen, multikriterielle Entscheidungsmethode eingesetzt wird. Die Anwendung kann durch verfügbare Softwaretools erleichtert werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Nach der Erläuterung der Grundlagen in Kapitel 2, 3 und 4 folgt in Kapitel 5 die systematische Literaturrecherche für die ausgewählten MCDM - Methoden. Folgend von Kapiteln zu den jeweiligen MCDM - Methoden mit der Analyse der einzelnen Ergebnisse sowie mit der Gegenüberstellung der Methoden schließt die Masterarbeit mit dem Kapitel Zusammenfassung und Ausblick ab.

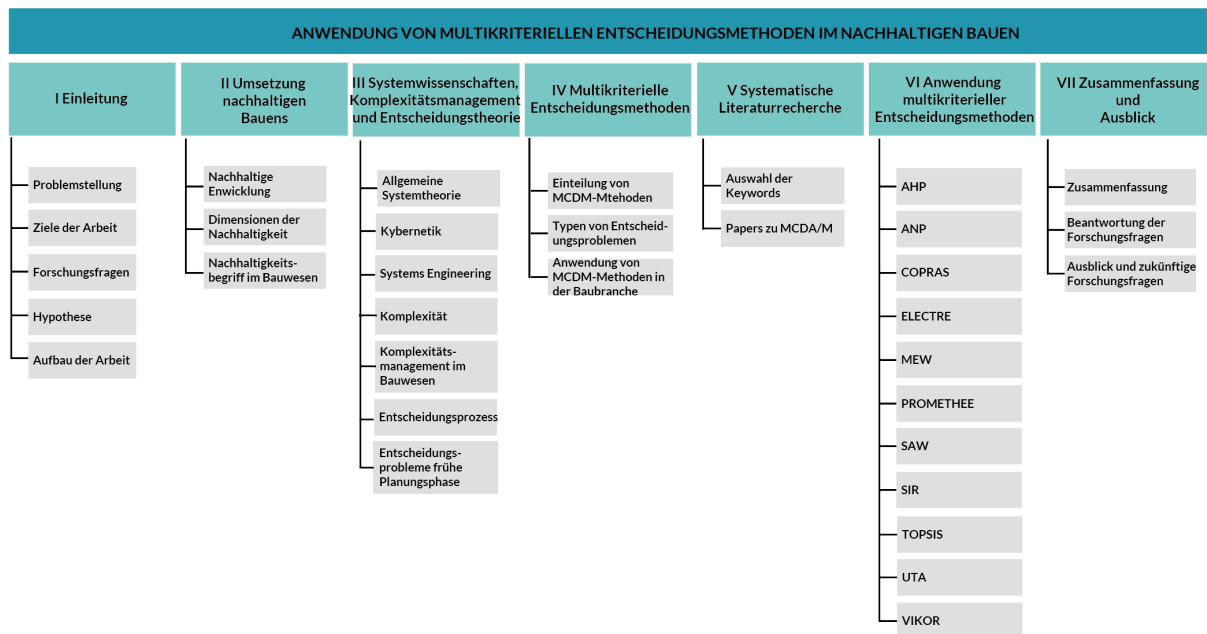


Abbildung 1.1: Aufbau der Masterarbeit

2 Umsetzung nachhaltigen Bauens

Durch auf europäischer Ebene harmonisierte Normen (hEN) und durch zahlreiche normative und freiwillige Instrumente – z.B. die Normenreihe ISO 14000 „Umweltmanagement“ [ISO14040-1997], [ISO14040-2006] wird die Umsetzung nachhaltigen Bauens vorangetrieben. Im Jahr 2008 wurde mit der ISO 15392 „Sustainability in building construction – General principles“ [ISO15392] ein einheitliches Nachhaltigkeitsverständnis in der Baubranche geschaffen [Passer2016]. Das europäische Rahmenwerk des CEN/TC 350 nahm neben den drei klassischen Dimensionen der Nachhaltigkeit – ökologische Dimension, ökonomische Dimension und soziale Dimension – zusätzlich funktionale und technische Qualitäten in die Betrachtung mit auf [EN15643-1], [EN15643-2], [EN15643-3], [EN15643-4]. Das eine erhöhte Gebäudequalität mit der zusätzlichen Berücksichtigung und Bewertung von Nachhaltigkeitskriterien bereits in der frühen Planungsphase und durch Monitoring nach Projektabschluss sichergestellt werden kann, ist unumstritten [Graubner2008].

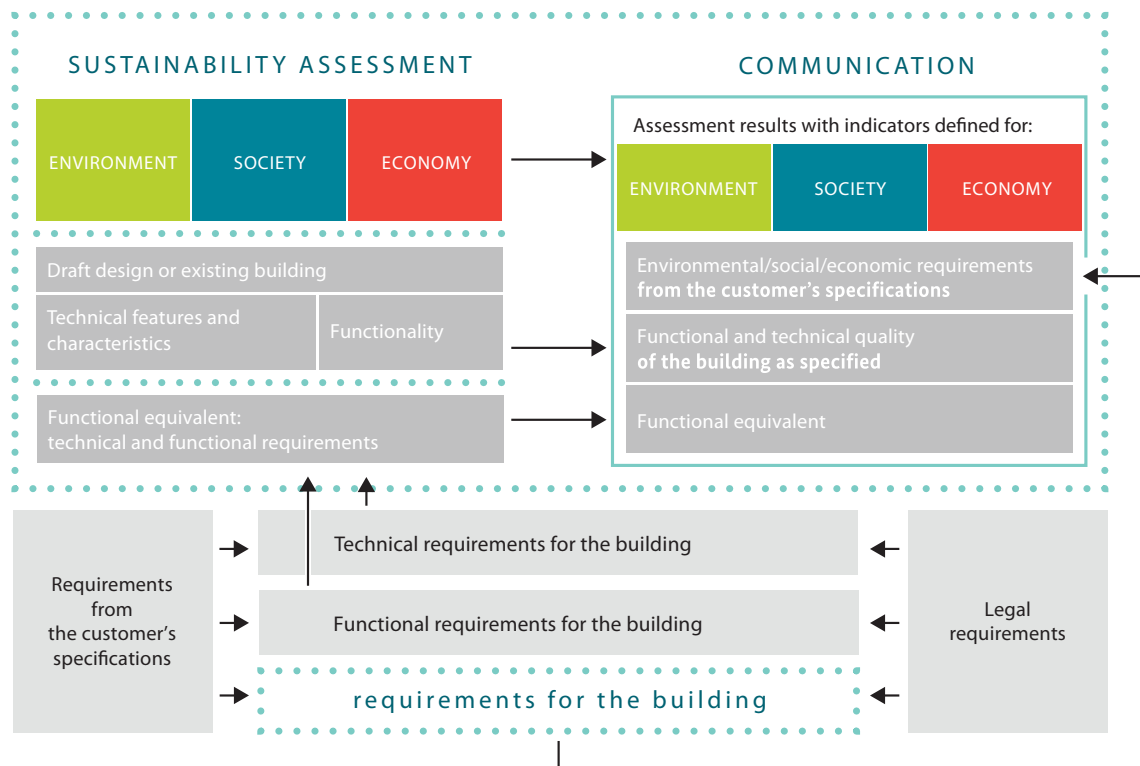


Abbildung 2.1: CEN/TC 350 Ansatz¹

In Abbildung 2.1 wird der Drei-Säulen Ansatz der Nachhaltigkeit mit den des CEN/TC 350 ergänzten funktionalen und technischen Anforderungen dargestellt.

2.1 Nachhaltige Entwicklung

Die historischen Wurzeln des Begriffes der Nachhaltigkeit reichen bis ins Jahr 1144 zurück. In der Forstordnung des elsässischen Klosters Mauerminster wurde der Grundgedanke festgehalten, dass „nicht mehr Holz eingeschlagen werden darf als jeweils nachwachsen kann“. Erste schriftliche Erwähnung des Begriffes finden sich im Werk „Sylvicultura Oeconomica“ von Carlowitz² im Jahr 1713 [Carlowitz1713].

Die wohl bekannteste Definition ist jene der nachhaltigen Entwicklung aus dem Brundtland-Bericht „Our common future“ der Vereinten Nationen aus dem Jahr 1987.

„Nachhaltige Entwicklung ist eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt,

¹Darstellung AGNHB - TU Graz

²1645 - 1714, deutscher Kameralist, königlich-polnischer und kurfürstlich-sächsischer Kammer- und Berggrat sowie Oberberghauptmann des Erzgebirges.

ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“ [Brundlandt1987].

Der Begriff der „Nachhaltigkeit“ wird in der heutigen Zeit inflationär verwendet. Die Bedeutung des Begriffes wird oftmals sehr unterschiedlich interpretiert. In der nachfolgenden Arbeit wird die Übersetzung „langfristig verträglich“ vom Englischen/Lateinischen (sustainable/sustinere) verwendet [Maydl2004]. In diesem Sinne gilt es für die Umsetzung nachhaltigen Bauens langfristige verträgliche Entscheidungen zu treffen, um die Eintrittswahrscheinlichkeit von unerwarteten Auswirkungen über den gesamten Gebäudelebenszyklus zu reduzieren.

2.2 Dimensionen der Nachhaltigkeit

Der Bericht *„Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“* der Enquete-Kommission [Enquete1998] hat sich darauf geeinigt, dass die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit aufgrund ihrer komplexen Zusammenhänge nicht als nebeneinander stehende Dimensionen, sondern als eng miteinander verknüpft gelten und somit gleichberechtigt und gleichwertig behandelt werden müssen [Passer2010].

Die **ökologische Nachhaltigkeit** umfasst neben dem Ziel Natur und Umwelt durch umweltschonende und ressourcenschonende Maßnahmen zu erhalten, auch den Schutz der Pflanzen- und Tierwelt. Dazu zählen Themenbereiche wie Erhalt der Artenvielfalt, Klimaschutz, Pflege von Kultur- und Landschaftsräumen und der schonende Umgang mit der natürlichen Umgebung [Passer2010].

Die **ökonomische Nachhaltigkeit** verfolgt das Ziel Lebenszykluskosten - also die Herstellungskosten, Nutzungs- und Erhaltungskosten sowie Rückbaukosten - eines Bauprojekts frühzeitig abzuschätzen und diese zu reduzieren. Im Sinne der langfristigen ökonomischen Verträglichkeit erscheint hier eine Aussage von *Ruskin*³ passend:

„Das Gesetz der Wirtschaft verbietet es, für wenig Geld viel Wert zu erhalten. Nehmen Sie das niedrigste Angebot an, müssen Sie für das Risiko, das Sie eingehen, etwas hinzurechnen. Und wenn Sie das tun, dann haben Sie auch genug Geld, um für etwas Besseres zu bezahlen.“

³1819 - 1900, britischer Schriftsteller, Maler, Kunsthistoriker und Sozialphilosoph

Die **soziale Nachhaltigkeit** strebt nach dem Schutz der Gesundheit der Menschen. Dazu zählen im weiteren Sinne auch Erhaltung der Ästhetik und die Steigerung des Nutzerkomforts.

2.3 Bedeutung des Nachhaltigkeitsbegriff im Bauwesen

Der Begriff der Nachhaltigkeit nimmt aufgrund dem über Jahrzehnte, mehrfach auch über Jahrhunderte andauernden Lebenszyklus von Bauwerken in der Bauindustrie einen besonderen Stellenwert ein. Hinzu kommt, dass Stakeholder bzw. Aktionäre oftmals nur die maximale Gewinnerzielung zum Ziel haben und ein kurzfristiges Renditedenken im Vordergrund steht. Dies führt dazu, dass Entscheidungsträger vor allem die negativen Auswirkungen von mittel- bzw. langfristigen Entscheidungen häufig nicht mehr abschätzen können. Die Förderung der nachhaltigen Entwicklung – und in diesem Sinne die Förderung der Umsetzung nachhaltigen Bauens – nimmt neben ihrer soziokulturellen und ökonomischen Bedeutung auch aufgrund der hohen Stoff- und Energieströme im Bauwesen eine Schlüsselrolle ein. Der enorme Energieverbrauch – meist aus nicht erneuerbaren Energieträgern – nimmt ca. 40 Prozent des weltweiten Verbrauchs ein und stellt daher für die Bauindustrie die oberste Priorität dar [Passer2010]. Beispielhaft seien weitere Faktoren hervorgehoben, welche die Wichtigkeit einer nachhaltigen Entwicklung und somit von langfristig, verträglichen Entscheidungen unterstreichen: [Meckmann2014]

- Die Bauindustrie beansprucht rund 50 Prozent aller auf der Welt verarbeiteten Rohstoffe.
- Im deutschsprachigen Raum werden mehr als 60 Prozent des anfallenden Abfalls durch die Bauindustrie erzeugt.
- Der Gebäudebetrieb beansprucht in Österreich und Deutschland ca. 50 Prozent des gesamten Energieeinsatzes.
- Die Raumheizung beansprucht dabei ca. ein Drittel des Gesamtenergieverbrauchs.
- Gebäude verursachen rund 40 Prozent der CO₂ - Emissionen.

2.3 Bedeutung des Nachhaltigkeitsbegriff im Bauwesen

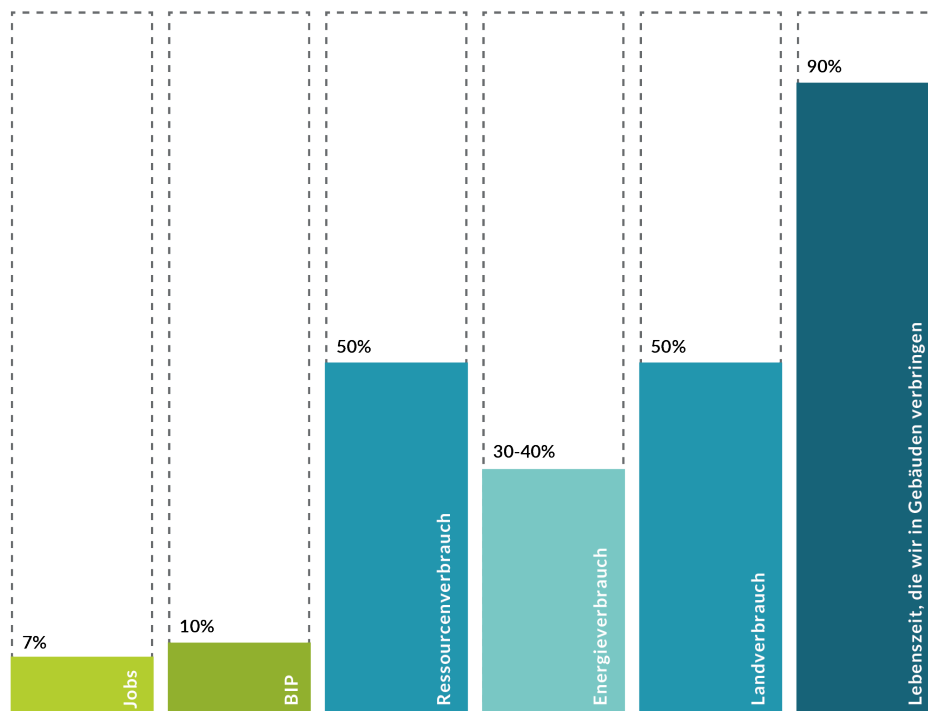


Abbildung 2.2: Die Bedeutung des Bausektors in Bezug auf eine nachhaltige Entwicklung⁴

Die ganzheitliche Betrachtung – d.h. ökologisch, ökonomisch, soziokulturell sowie funktional und technisch – von Bauaktivitäten stellt nicht nur einen Megatrend in der Bauindustrie dar, sondern beginnt sich in den letzten Jahren vor allem durch die Unterzeichnung des Pariser Klimaabkommens [COP21] sowie diverser Sachstandsberichte [APCC2014], [IPCC2014] auch in der alltäglichen Praxis zu verankern. Im Sinne der Ziele der Weltgemeinschaft und der europäischen und nationalen Anforderungen an die Bauindustrie ist eine harmonisierte und transparente Bewertungsmethodik von Gebäuden bzw. von ganzen Stadtquartieren über alle Lebensphasen des Lebenszyklus entscheidend. Dadurch wird die Harmonisierung von Bewertungsmethoden sowie deren praktische Anwendung im Planungsprozess immer bedeutungsvoller [Passer2010]. Ist es gerade diese Phase, welche eine Vielzahl an Entscheidungen erfordert und eine Implementierung von Nachhaltigkeitsaspekten am ehesten möglich macht [Scherz2016]. Die langen Nutzungsdauern von Gebäuden erfordern neben der passenden Bewertungsmethodik im frühen Planungsprozess auch Hilfsmittel, welche die Auswirkungen von Entscheidungen einfacher abschätzbar machen und somit den Entscheidungsprozess unterstützen.

⁴Darstellung AGNHB - TU Graz in Anlehnung an [Wallbaum2008]

3 Systemwissenschaften, Komplexitätsmanagement und Entscheidungstheorie

Im folgenden Kapitel werden notwendige Begriffe definiert und allgemeine Grundlagen zum Themenbereich der Systemwissenschaften, Komplexitätsmanagement und Entscheidungstheorie erläutert.

Die Wurzeln der Systemwissenschaften reichen weit in unsere Vergangenheit zurück. Mit dem Satz „*Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile*“ wies bereits *Aristoteles*¹ darauf hin, dass es nicht ausreichend ist die Teilbereiche eines Systems zu kennen, sondern auch die Beziehung dieser Teile untereinander von entscheidender Bedeutung sind. Die ersten Schritte weg vom Systemdenken sind auf das mechanische Weltbild, welches vor allem durch *Galileo Galilei*² und *Isaac Newton*³ geprägt wurden, zurückzuführen. Dieser mechanische Ansatz (resolutive Methode) hat seinen Ursprung in der Geburt der modernen Naturwissenschaften. Ab dem 17. Jahrhundert wurde das Weltbild des *Aristoteles* von der resolutiven Methode verdrängt. Diese besagt, dass durch die Eigenschaften der Teile das Verhalten des Ganzen vollkommen verständlich ist [**Schalcher2008**]. Erste Gegenströmungen zum mechanischen Weltbild ließen nicht lange auf sich warten und wurden bereits im späten 17. Jahrhundert bzw. frühen 18. Jahrhundert formuliert. Die späteren Gründerväter der allgemeinen Systemtheorie *Bertalanffy*⁴ und der Kybernetik *Wiener*⁵ beziehen sich mehrmals auf die Ansätze von *Leibniz*⁶ [**Leibniz1996**] und *Kant*⁷ [**Kant1979**]. *Leibniz* gilt als Schutzheiliger der Kybernetik. Seine Ideen werden später in der allgemeinen Systemtheorie fortgeführt [**Sytem2010**]. Der Weg zurück zum Systemdenken wurde weiters im späten 18. Jahrhundert durch die sogenannte

¹384 v. Chr. - 322 v. Chr., Philosoph und Naturforscher

²1564 - 1641, Philosoph, Mathematiker, Ingenieur, Physiker, Astronom und Kosmologe

³1642 - 1726, englischer Naturforscher und Verwaltungsbeamter

⁴1901 - 1972, theoretischer Biologie und Systemtheoretiker

⁵1894 - 1964, US-amerikanischer Mathematiker

⁶1646 - 1716, deutscher Philosoph, Mathematiker, Jurist, Historiker und politischer Berater der frühen Aufklärung

⁷1724 - 1804, deutscher Philosoph der Aufklärung

„romantische Bewegung“ wiedergefunden. Ein Grundsatz der romantischen Bewegung war, dass im Gegensatz zu Maschinen, in welchen nur Teile füreinander existieren, Organismen sich selbst reproduzierende und selbstorganisierende Ganze sind [**Schalcher2008**].

In der Literatur findet sich oftmals die Unterteilung der Systemwissenschaften in die Bereiche

- Systemtheorie
- Systemanalyse
- Systemtechnik (Kybernetik)

3.1 Allgemeine Systemtheorie

Kulturgeschichtlich gehen die ersten Ansätze einer allgemeinen Systemtheorie auf *Johann Heinrich Lambert*⁸ zurück. In einer seiner Arbeiten findet sich die folgende Definition des Systembegriffs: Ein System ist ein „*zweckmäßig zusammengesetztes Ganzes*“, dessen Teile „*mit Absicht gestellt oder geordnet, und alle miteinander so verbunden seyn, daß sie gerade das der vorgesetzten Absicht gemäßige Ganze ausmachen und dieses muß (...) fort dauern können*“ [**Lambert1969**]. Die Systematologie von *Lambert* weist eine Vielzahl von Vorwegnahmen und Ähnlichkeiten zur späteren allgemeinen Systemtheorie auf. Sein Begriff des Systems soll für alle konkreten Systeme gelten und stellt ein System - anders als der Systembegriff bei *Kant* - als real existierend dar [**Sytem2010**].

Als Begründer der Systemtheorie gilt *Ludwig von Bertalanffy*⁹, indem er sagte: „*Die allgemeinsten Prinzipien der Wissenschaft erscheinen als die gleichen, obwohl es sich um unbelebte Naturdinge, um Organismen, um seelische oder gesellschaftliche Vorgänge handelt*“. Dabei war er davon überzeugt, dass Untersuchungsgegenstände nicht nur aus den Bestandteilen bestehen, sondern auch durch die Zusammenhänge der Bestandteile gekennzeichnet sind.

Unter dem Begriff der Systemtheorie lassen sich Theorien aus mehreren Forschungsgebieten integrieren [**Gomez1981**], [**Wilms2001**]. Im Mittelpunkt der Systemtheorie stellt sich die Frage nach den Zusammenhängen komplexer Systeme, ihrer Struktur und ihrer Entwicklungen . Durch parallele Entwicklungen und nicht eindeutigen Grenzen, spiegelt sich die Systemtheorie in den Begriffen wie zum Beispiel, Ordnung, Gleich- und Ungleichgewicht, Offenheit, Ganzheit,

⁸1728 - 1777, schweizerisch-elsässischer Mathematiker, Logiker, Physiker und Philosoph der Aufklärung

⁹1901 - 1972, theoretischer Biologie und Systemtheoretiker

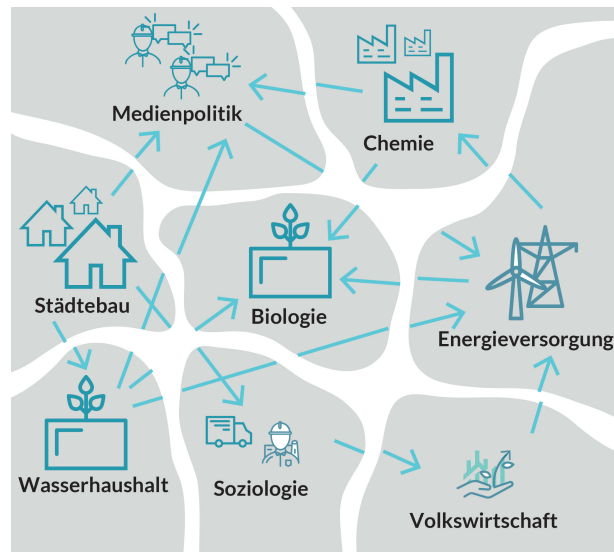
Evolution, Dynamik oder Komplexität wider. Nach *Wilms*¹⁰ ist die Systemtheorie eine noch entstehende Wissenschaft, wodurch es kein geschlossenes Konzept noch eine eindeutige Einteilung der verschiedenen Systemansätze gibt [**Wilms2001**].

Die Weiterentwicklung des Mikroskop Ende des 19. Jahrhunderts führte dazu, dass für sämtliche Probleme wieder physikalische und chemische Erklärungen gesucht wurden. Aufgrund zahlreicher Entdeckungen von Biologen wurde der Eindruck vermittelt, dass die Eigenschaften und Funktionen von lebenden Organismen mittels physikalischer und chemischer Gesetze erklärbar sind. Der Fortschritt dieses Ansatzes war eine Denkweise, die als quantifizierend, mathematisch und exakt zu bezeichnen war. Alle Faktoren, welche nicht messbar bzw. nicht mathematisch beschreibbar waren, verschwanden aus der Wissenschaft [**Schalcher2008**]. Parallel dazu bildete sich jedoch schon eine nächste Gegenströmung. Der Vitalismus fügte den Gesetzen der Chemie und der Physik einen weiteren nichtphysikalischen Faktor - die Lebenskraft - hinzu [**Schalcher2008**]. Dem gegenüber standen wiederum die organismischen Biologen, welche den Gesetzen der Chemie und der Physik noch das Verständnis der organisierenden Beziehungen hinzufügten. Der systemische Ansatz besagt somit, dass sich die Eigenschaften der Teile nur durch die Organisation bzw. Betrachtung des Ganzen verstehen lassen [**Schalcher2008**].

Exkurs: Systemdenken

Die Einführung des Systemdenkens basiert darauf, dass die Anwendung von veralteten Problemlösungsmethoden aus der Vergangenheit, aufgrund von Vernetztheit, Komplexität, Rückkopplungen etc., der Probleme heutiger Generationen nicht mehr angemessen sind. Die Adaptierung neuer Denkweisen fällt nicht dem Intelligenzmangel der Menschheit zum Opfer, sondern vielmehr der Schwierigkeit über Jahrhunderte angewandte Denkstrukturen abzulegen [**Schalcher2008**]. Die ersten Einschränkungen des vernetzten Denkens (Systemdenkens) finden spätestens zu Beginn der Schulpflicht statt. Durch ein striktes Auftrennen von Fächern wie Rechnen, Schreiben und Sachunterricht werden erste Vernetzungen ausgeblendet. Viel gravierender werden diese Abgrenzungen der einzelnen Themenbereiche in den späteren Schulstufen und den Universitäten betrieben. In Abbildung 3.1 soll diese Auftrennung in einzelne Teilsysteme dargestellt werden. Durch das Vernachlässigen der Interaktionen zwischen den Teilsystemen werden übergreifende mittel- bzw. langfristige Auswirkungen nicht sichtbar.

¹⁰1961 - , deutscher Wirtschaftswissenschaftler

Abbildung 3.1: Auftrennen der Systemgrenzen¹¹

Aufgrund des Auftrennens der einzelnen Dinge nach Fachbereichen und Lebensbereichen und dem Vergessen der in der Wirklichkeit existierenden verbindenden Beziehungen verlieren wir an kybernetischen Verständnis [Vester2008].

Exkurs: Systemanalyse

Die Systemanalyse stellt die praktische anwendbare Methode der Systemtheorie dar. Dabei geht es um die Modellbildung des Systems aus Sicht des Betrachters. Modellerte Systeme - vor allem bei komplexen Systemen - stellen meist ein reduziertes, begrenztes und abstrahiertes Abbild der Realität dar. Ziel der Systemanalyse ist es, mit der vereinfachten Modellbildung Aussagen über vergangene und zukünftige Verhaltensweisen und Entwicklungen von Systemen - oftmals in unterschiedlichen Szenarien - darzustellen.

Folgende Arbeitsschritte sind der Systemanalyse zuzuordnen:

- Erhebung und Analyse einer Problemstellung
- Konkretisierung einer Zielsetzung
- Festlegen der Systemgrenzen
- Feststellen der relevanten Systemelemente
- Feststellen der relevanten Beziehungen zwischen den Systemelementen
- Feststellen der Systemeigenschaften
- Feststellen der Beziehungen des Systems zur Umwelt bzw. zu anderen Systemen

¹¹Eigene Darstellung in Anlehnung an [Vester2008]

3.2 Kybernetik

Als dritte Säule der Systemwissenschaften - neben der Systemtheorie und der Systemanalyse - wird die Systemtechnik (Kybernetik) genannt. Eine Unterteilung dieser drei Gliederungen der Systemwissenschaften ist in den meisten Fällen nicht detailliert zu erkennen, da sich die Bereiche überschneiden und die Grenzen ineinander fließen.

Kybernetik ist die Disziplin, die die Kommunikation und Kontrolle in Lebewesen und die vom Menschen gebauten Maschinen untersucht. Eine philosophischere Definition, die von *Louis Couffignal*¹² 1958 vorgeschlagen wurde, betrachtet die Kybernetik als „*die Kunst, Effizienz zu gewährleisten*“. Das Wort wurde zuerst von *Platon*¹³ im Sinne von „Lenkkunst“ oder „Regierungskunst“ verwendet. *Ampère*¹⁴ benutzte das Wort Kybernetik, um „das Studium von Regierungsformen“ zu bezeichnen. Die Kybernetik hat in der Tat die gleiche Wurzel wie die Regierung: die Kunst, hochkomplexe Systeme zu managen und zu steuern [**HistCyb2019**].

Als Begründer der Kybernetik gilt *Norbert Wiener*¹⁵. Der Begriff Kybernetik (griechisch: „kybernán“) bedeutet steuern, leiten und regieren [**Wiener1948**], [**Wiener1950**]. Eine modernere Bedeutung des Begriffes ist: „*Wissenschaft über die möglichen Strukturen, Funktionen und Verhalten in sich selbst organisierenden und regelnden dynamischen Systemen*“ [**Kirchmayr2001**]. *Vester* betont dabei, die oftmals missverstandene Assoziation der Kybernetik mit Regeltechnik und Computersteuerung und hebt hervor, dass die Kybernetik ihren Ursprung in den lebenden Organismen hat [**Vester2008**].

Allgemein kann die Kybernetik als „*interdisziplinäre Metawissenschaft der Lenkung und Regelung von dynamischen Systemen*“ verstanden werden [**Sytem2010**].

Dabei wird die Kybernetik oft in die Kybernetik erster Ordnung und Kybernetik zweiter Ordnung unterschieden. Bei beiden Ansätzen wird der Beobachter in das Zentrum des Systems gestellt, wodurch dieser die Komplexität - abgegrenzt von der Umwelt - erfassen kann. Bei der Kybernetik erster Ordnung gibt der Beobachter ein Ziel von außen vor und kann auch steuernd in das System eingreifen. Dadurch werden die Strukturen und Grenzen des Systems von außen bestimmt und das System kann losgelöst von der Umwelt betrachtet werden [**Schulz2014**]. Die Kybernetik zweiter Ordnung wurde erstmals von *Von Foerster*¹⁶ erforscht [**Foerster1973**]. Bei

¹²1902 - 1966, französischer Mathematiker und Kybernetiker

¹³428 v. Chr. - 348 v. Chr., antiker griechischer Philosoph

¹⁴1775 - 1836, französischer Physiker und Mathematiker

¹⁵1894 - 1964, US-amerikanischer Mathematiker

¹⁶1911 - 2002, österreichischer Physiker, Professor für Biophysik und langjähriger Direktor des Biological Computer

diesem Ansatz wird der Beobachter in das System integriert. Dabei besteht das System aus Subsystemen, welche selbst zielorientiert sind und jedes Element selbst der Betrachter sein kann [Schulz2014].

Exkurs: Baukybernetik

In der Bauindustrie betrifft das Leiten und Steuern vor allem die Kybernetik von Bauprozessen [Zimmermann2010] bzw. die Kybernetik von Energiekonzepten [Pfeifer2010]. Die deutsche Gesellschaft von Baukybernetik¹⁷ versteht unter Baukybernetik das Stattfinden einer Selbstorganisation im vernetzten Geschehensgefüge der Bauindustrie [Hafner2011].

Die wichtigsten Aspekte der Baukybernetik sind [Baukyb2016]:

- vorausschauende Planung, mit dem Ziel, beeinflussende interne und externe Faktoren zu identifizieren und diese so zu visualisieren, dass sie vom menschlichen Gehirn unmissverständlich verstanden werden,
- ständige SOLL - IST Vergleiche durchzuführen, um frühzeitige Abweichungen zu erkennen und Gegenmaßnahmen einleiten zu können,
- ständiges Miteinbeziehen aller projektbeteiligten Personen bei der Definition von Zielen mit dem Grundgedanken zur Nachvollziehbarkeit und Transparenz,
- das Reduzieren komplexer Zusammenhänge nach dem Unschärfe-Prinzip und transparente Kommunikation mit allen projektbeteiligten Personen, um Lösungswege zu finden,
- das Schaffen von günstigen Rahmenbedingungen für einen positiven Projektabschluss.

3.3 Systems Engineering

Die gewonnenen Erkenntnisse aus Systemtheorie und Kybernetik führten zu zahlreichen interdisziplinären Ansätzen. Besonders erwähnenswert ist der von Forrester¹⁸ entwickelte Ansatz *System-Dynamics* [Forrester1977].

Laboratorys (BCL) in Illinois

¹⁷<http://www.baukybernetik.de/>

¹⁸1918 - 2016, US-amerikanischer Informatiker sowie Pionier der Computertechnik und der Systemwissenschaft

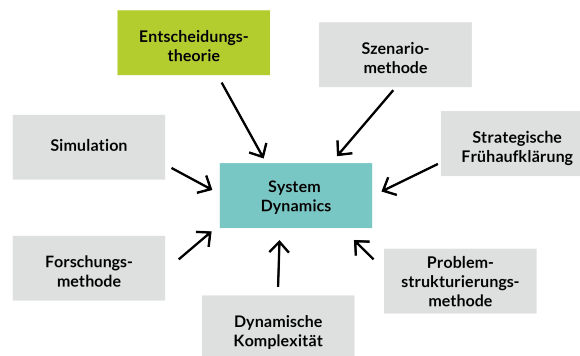


Abbildung 3.2: Verbindung von System Dynamics zu anderen Bereichen

Aus den Grundzügen von System Dynamics entwickelte sich speziell für die Anwendung in den Ingenieurwissenschaften der Begriff des Systems Engineering. Ein Wendepunkt und somit der Ausgangspunkt für die Entwicklung des Systems Engineering waren die fünfziger Jahre. Durch die immer komplexer werdenden Systeme und den nicht mehr überschaubaren Schnittstellen und Wechselwirkungen mussten ganzheitliche Methoden entwickelt werden [Oose2017]. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden auf der ganzen Welt mehrere große und zeitlose Bauwerke wie z.B. die Pyramiden, römische Aquädukte, die Hoover-Staudämme, die Brooklyn-Bridge und das Empire State Building, um nur einige zu nennen, realisiert. Während diese Architekturen große Ingenieurleistungen waren, zeigten sie einen gewissen Grad an Komplexität, die nur eine begrenzte Anzahl von Ingenieurdisziplinen beinhaltete. Mitte der fünfziger Jahre entwickelten sich Systeme mit einer größeren Komplexität. Das Aufkommen des Computers stellte sicher, dass die Welt in der Lage wäre, Missionen und Aufgaben durchzuführen, die bisher unvorstellbar waren. Einige Beispiele dazu sind nukleare U-Boote und Schiffe, Raketen mit Atomwaffen, Satelliten und Raumfahrzeuge. Diese neuen Systeme zeigten eine andere Art von Komplexität und erforderten daher ein breiteres Engagement der verschiedenen Ingenieurdisziplinen. Die Disziplin des Systems Engineering entwickelte sich, um die notwendigen Designprozesse zu entwickeln und als Schnittstelle zwischen den verschiedenen Ingenieurdisziplinen zu agieren [Triantis2009].

Unter Systems Engineering wird ein interdisziplinärer Ansatz verstanden, mit welchem komplexe technische Systeme in Projekten entwickelt und realisiert werden können. Im Zentrum des Begriffes stehen die Kundenanforderungen an das System (z.B. an das Bauprojekt), welche innerhalb von Terminen, Kosten und Qualität erfüllt werden müssen. Um diese Ziele zu erreichen werden komplexe Systeme in Subsysteme zerlegt und die Implementierung über alle Projektphasen kontrolliert. Systems Engineering bildet einen einheitlichen, strukturierten Prozess, welche alle Ingenieurdisziplinen und Fähigkeiten integriert.

Für den Begriff des Systems Engineering gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Definitionen. Um einen ersten Einblick in die Thematik zu geben, werden nachfolgend einige genannt:

- Systems Engineering is “an interdisciplinary approach and means to enable the realization of successful systems” [**INCOSE2017**].
- Systems Engineering is “an iterative process of top-down synthesis, development, and operation of a real-world system that satisfies, in a near-optimal manner, the full range of requirements for the system” [**Eisner2008**].
- Systems Engineering is a “methodical, disciplined approach for the design, realization, technical management, operations, and retirement of a system” [**NASA2007**].
- Systems Engineering is “an interdisciplinary management process to evolve and verify an integrated, life cycle balanced set of system solutions that satisfy customer needs” [**DSMC1999**].

Eine Zusammenfassung der historischen Entwicklung bis zum Begriff des Systems Engineering ist in nachfolgender Abbildung 3.3 dargestellt.

3.3 Systems Engineering

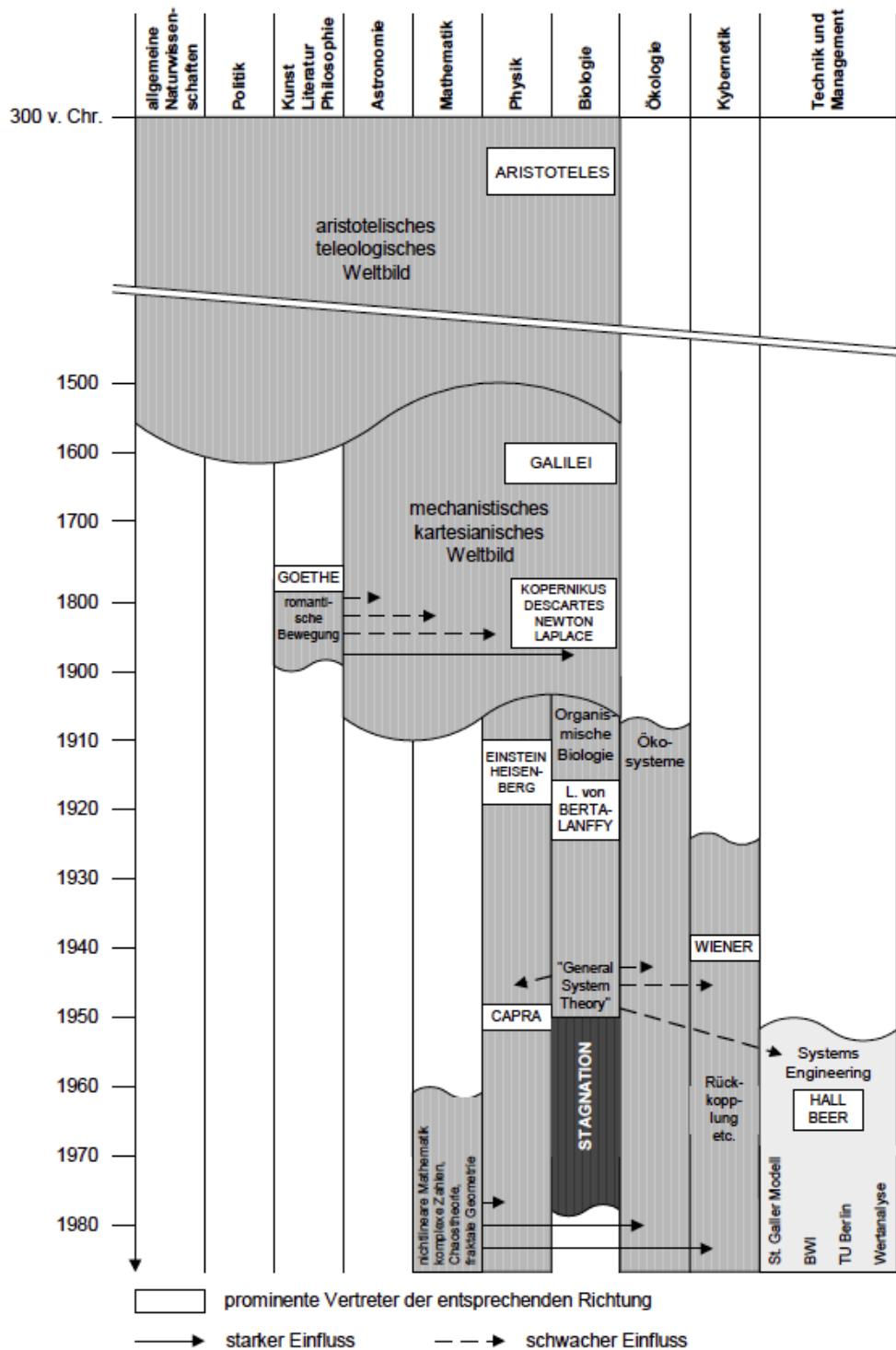


Abbildung 3.3: Die Entwicklung des Systems Engineering¹⁹

Auf der Ebene des Systems Engineering spielt die Initiative *INCOSE* eine tragende Rolle bei der Entwicklung von Normen. Diese Normen zielen darauf ab, die Schnittstellen zwischen Unternehmen und Steuerungssystemen zu automatisieren. Eine bedeutende Entwicklung geht

¹⁹Systems Engineering. Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich [Schalcher2008]

aus den Normen ANSI/ISA95 [ISA2018] und IEC / ISO 62264 [IEC62264-2] hervor. Das Ziel ist es, Risiko, Kosten und Fehler bei der Implementierung der Schnittstellen zu reduzieren [Chang2008].

Speziell in der Baubranche ist Systems Engineering sehr stark mit dem Begriff Projekterfolg verknüpft. Dabei gilt es nicht nur als Projekterfolg die Anforderungen der Eckpunkte des Dreiecks Qualität, Zeit und Kosten zu erfüllen, sondern noch einer Vielzahl an weiteren Faktoren genüge zu tun. Bereits im Jahr 1999 fügte *Atkinson* diesem Dreieck die Faktoren Informationssystem, Vorteile für das Unternehmen und Vorteile für die Stakeholder hinzu [Atkinson1999]. Als Beispiel dazu sei der Terminal 5 des Londoner Flughafens Heathrow genannt, welcher in vorgegebener Zeit, vorgegebenem Budget und vorgegebener Qualität fertiggestellt wurde, jedoch im Betrieb kollabierte und tausende von Gepäckstücken verloren gingen und hunderte von Flügen gestrichen werden mussten [Davies2009].

Die im Aufbau unterschiedlichen Ansätze der Systemtheorie und der Kybernetik fließen in die Komplexitätstheorie ein. Ziel der Komplexitätstheorie ist, dass aus Chaos eine organisierte Komplexität durch Einführung von Ordnungsstrukturen entsteht. Ein Fazit der Komplexitätstheorie ist jedoch, dass der Mensch bei der Konstruktion und Steuerung von technischen und sozialen Systemen bei Beibehaltung derzeitiger, traditioneller und mechanistischer Methoden und den gleichzeitig gestiegenen Anforderungen, welche zum Anstieg der Komplexität führen, nicht mehr gerecht werden kann [Schulz2014].

3.4 Komplexität

Nach dem *Gabler Wirtschaftslexikon* [Gabler2017] definiert sich der Begriff der Komplexität mit der Vielfalt der Beziehungen zwischen den Elementen eines Systems. Weiter in der Definition geht *Kolbusa* [Kolbusa2013], welcher die Komplexität und auch dessen Auswirkungen beschreibt:

„Sachverhalte werden immer dann als komplex empfunden, wenn einzelne Elemente so miteinander verknüpft sind, dass die Auswirkungen einer Handlung nicht mehr abgeschätzt werden können. Kennzeichen komplexer Systeme sind eine Struktur mit vielen Elementen, die zusätzlich miteinander interagieren, und eine hohe Dynamik mit hoher Änderungsstärke und -häufigkeit der Elemente.“

Eine auf der Etymologie basierte Definition stammt von *Kirchhof* [Kirchhof2003]:

„Der Begriff Komplexität geht auf das lateinische Wort *complexus* bzw. *complectere* zurück, welches für *verschlungen, verflochten, umfassen und zusammengebunden* steht.“

3.4.1 Abgrenzung zur Kompliziertheit

Im alltäglichen Sprachgebrauch werden die Begriffe „kompliziert“ und „komplex“ oftmals als Synonyme verwendet. Gerade im Bezug auf das Bauwesen ist es von Bedeutung eine Abgrenzung zur Kompliziertheit vorzunehmen.

Merkmale eines komplizierten Systems sind:

- mehr als zwei Faktoren beeinflussen das System
- alle Einflussfaktoren sind bekannt und beherrschbar
- die Einflussfaktoren stehen nicht in Wechselwirkung zueinander

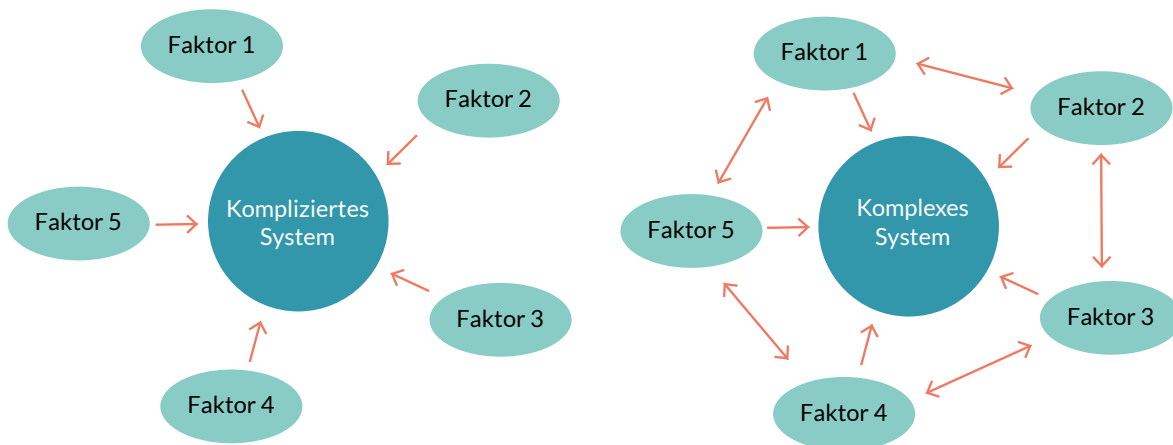


Abbildung 3.4: Unterschied zwischen einem komplizierten und komplexen System²⁰

Durch den Faktor der Dynamik kann der Zusammenhang zwischen Komplexität und Kompliziertheit wie folgt beschrieben werden:

$$\text{Komplexität} = \text{Kompliziertheit} + \text{Dynamik}$$

²⁰Eigene Darstellung in Anlehnung an [Komplexvkompliziert]

3.4.2 Was ist ein komplexes System

Als System wird eine Vielzahl von zusammenhängenden Elementen verstanden [Baumgartner2011]. Nach Kirchmayr-Kreczi besteht ein System aus mehreren verschiedenen Teilen, welche in einem bestimmten Aufbau miteinander vernetzt sind. Daher verhält sich ein System komplett anders als seine Teile [Kirchmayr2001]. Anhand zweier Definitionen soll der Begriff des komplexen Systems erläutert werden. Wie im *Gabler Wirtschaftslexikon* hängt auch nach Okubo die Komplexität eines Modells mit der Anzahl der Parameter zusammen.

„The more complex a model becomes, the more parameters are involved“ [Okubo2001]. Ebenso wie Kolbusa fügt auch Leser neben der Anzahl an Parameter eines System, dessen Zusammenhänge bzw. Interaktionen zwischen den einzelnen Elementen hinzu. „Der Komplexitätsgrad eines Systems bestimmt sich aus der Angabe der Teile/Elemente sowie der Interaktionen bzw. Relationen zwischen den Teilen/Elementen.“ [Leser1997] Die zwei Merkmale welche den Begriff der Komplexität definieren zu versuchen sind demnach die Anzahl der Elemente bzw. Parameter und deren Beziehungen bzw. Zusammenhänge untereinander.

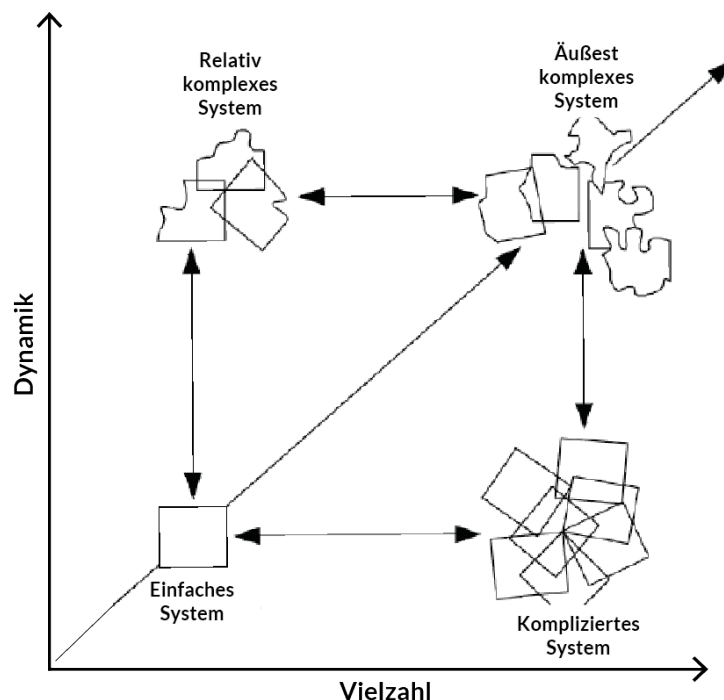


Abbildung 3.5: Einfache, komplizierte und komplexe Systeme²¹

Um komplexe Systeme verstehen zu können verlangt es nach einem Denken in Zusammenhängen. Mit einem systemgerechten Ansatz und abweichenden Hilfsmitteln von den bisherigen

²¹Systems Engineering, Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich [Schalcher2008]

Methoden des Managements ist es machbar komplexe Systeme zu erfassen und ihr Verhalten besser zu verstehen [Vester2008].

3.4.3 Umgang mit komplexen Systemen

Die drastischen globalen Umweltveränderungen erfordern problemadaptierte Entscheidungs- und Handlungsstrategien im Umgang mit unserer komplexen und dynamischen Umwelt. Akteure und Entscheidungsträger scheinen nur ungenügend gerüstet, um mit der auftretenden Komplexität in den Systemen umgehen zu können. Die derzeitige Umweltkrise und die oftmals scheiternden Bemühungen diese zu bewältigen, weist auf die Problematik hin, dass komplexe Systeme verstanden und deren Dynamik überschaubar werden müssen. Auch Umweltmodelle wie jenes von Meadows [Meadows1972] trugen nicht ausreichend zur Entwicklung wissenschaftlicher Entscheidungskompetenzen im Umgang mit einer hochkomplexen Umwelt bei [Lantermann2000].

Bauherren und Planer sind gezwungen in kurzen Zeiträumen Entscheidungen zu treffen, welche von einer Vielzahl zusammenhängenden Kriterien beeinflusst werden und langfristige Auswirkungen haben können. Nach Halford [Halford2005] ist der Mensch nicht in der Lage die Auswirkungen von mehr als vier zusammenhängenden Kriterien aufeinander abschätzen zu können. Die Problematik der Baubranche im Speziellen ist, dass jedes Bauwerk ein Unikat darstellt. Jedes Bauwerk muss demnach von Grund auf neu geplant und errichtet werden. Diese Tatsache erschwert die Entscheidungsfindung erheblich, da dadurch das Wissen durch langjährige Berufserfahrung nicht allgemein anwendbar ist.

Nach den am Beginn dieses Kapitels angeführten Begriffsdefinitionen zur Komplexität wird der Prozess der Bauwerksplanung und der Bauwerkserrichtung als komplexes System bezeichnet. Die sechs Fehler im Umgang mit komplexen Systemen nach Dörner [Doerner2003] werden nachfolgend auf die Baubranche umgelegt.

1. Falsche Zielbeschreibung

Statt die Optimierung des Systems zu verfolgen wird oftmals versucht Einzelprobleme zu lösen. Das System bzw. das Bauwerk wird solange geplant bis ein Problem auftritt. Dieses Problem wird beseitigt und es wird weiter geplant bis das nächste Problem auftritt. Durch die Beseitigung der folgenden Probleme kann jedoch ein Eingriff in die bereits gefundenen

Lösungen der vorangegangenen Probleme getätigt werden. Dieses Verhalten wird als Reperaturdienstverhalten bezeichnet [**Vester2008**].

2. Unvernetzte Situationsanalyse

Eine große Menge an Informationen und Daten bedeutet nicht zwangsläufig die Zusammenhänge des Systems verstanden zu haben. Aufgrund fehlender Berücksichtigung der Zusammenhänge, deren Rückkoppelungen und daraus entstehenden aufschaukelnden Auswirkungen ist eine sinnvolle Auswertung der Datenmassen nicht möglich. Der kybernetische Charakter des Systems wird somit nicht erfasst und die Dynamik bleibt unerkannt [**Vester2008**].

3. Irreversible Schwerpunktbildung

Die Festlegung auf einen Schwerpunkt führt zum Vernachlässigen anderer Bereiche [**Vester2008**]. Beispielhaft sei hier die Reduktion der Herstellungskosten genannt. Durch die Konzentration in der Planung durch ausgewählte Maßnahmen die Herstellungskosten zu reduzieren, kann es nicht nur dazu kommen, dass durch erhöhte Nutzungskosten bzw. erhöhte Rückbaukosten die Gesamtkosten steigen, sondern auch dazu, dass Anforderungen an die soziokulturellen, funktionalen und technischen Qualitäten, wie z.B. thermischer Komfort, akustischer Komfort oder visueller Komfort, darunter leiden.

4. Unbeachtete Nebenwirkungen

Eine Folge der irreversiblen Schwerpunktbildung ist häufig das Vergessen von Nebenwirkungen. Wie bereits erwähnt können durch gesetzte Maßnahmen, um ein Ziel zu erreichen, andere Ziele darunter leiden. Unbeachtete Nebenwirkungen treten oftmals auf wenn für die angewandten Strategien keine Wenn-Dann-Analysen durchgeführt werden [**Vester2008**].

5. Tendenz zur Übersteuerung

Die Tendenz zur Übersteuerung beschreibt die Problematik eines starken Eingreifens in ein System. Werden zuerst kleinere Eingriffe getätigt, welche das System nicht verändern, so sind die folgenden Eingriffe meist stärker, um dann bei den ersten unvorhersehbaren Auswirkungen - aufgrund der zeitlich verzögernden summierenden kleinen Eingriffe - das System zu übersteuern bzw. zum vollständigen Stillstand zu bringen [**Vester2008**].

6. Tendenz zu autoritärem Verhalten

Ähnlich einem diktatorischen Verhalten führen die Macht zur Systemveränderung und die Einbildung das System verstanden zu haben häufig zu Fehlentscheidungen in Projekten [**Vester2008**].

Es könnten noch zahlreiche Beispiele für die Fehler im Umgang mit komplexen Systemen - also für ein unvernetztes Vorgehen mit entsprechenden Nebenwirkungen - aufgezählt werden, zusammenfassend soll jedoch unterstrichen werden, dass das Hauptproblem darin liegt, dass die Qualifikation der projektbeteiligten Experten an den Grenzen des jeweiligen Fachgebiets endet und in den meisten Fällen der Überblick über die kybernetischen Zusammenhänge der Fachgebiete fehlt [**Vester2008**].

3.5 Komplexitätsmanagement im Bauwesen

Die Integration und die Vernetzung von Technologien und Prozessen sind heute so hoch wie nie zu vor. Der rasche Wandel mit neuen Technologien, Techniken und Organisationen fördert diese Entwicklung enorm. Aus diesem Grund kommt dem Themenbereich Komplexitätsmanagement - einer der Erfolgsfaktoren der Zukunft - große Bedeutung zu [**Woelfling2013**].

Merkmale der Baubranche bzw. der Umsetzung von Bauprojekten sind die Beteiligung von einer großen Anzahl an Projektbeteiligten, unterschiedlichen Zielsetzungen und neuen Konstellationen der Projektbeteiligten für unterschiedliche Bauaufgaben. Dabei existieren Wechselwirkungen mit unterschiedlichen zeitlichen Auswirkungen (kurzfristige, mittelfristige und langfristige Effekte) zwischen den Bauaufgaben sowie zwischen jeder getroffenen Entscheidung. Die Unikatstellung der Bauwerke und deren unterschiedliche Einflüsse über den gesamten Lebenszyklus stellen Architekten und Ingenieure vor immer komplexer werdende Herausforderungen. Die Komplexität im Bauwesen kommt durch verschiedene bautechnische und baurechtliche Rahmenbedingungen sowie durch zahlreiche, unterschiedliche Entscheidungsträgerpräferenzen und Ausführungsmöglichkeiten zu Stande. Die zahlreichen Anforderungen an ein Gebäude, wie Grundrisslösungen, Nutzbarkeiten, Statik, technische Gebäudeausrüstung, Instandhaltung und Instandsetzung, Ästhetik, gesetzliche Richtlinien, Mieteinnahmen etc. treten bereits in der Projektvorbereitung, in der Konzeption und der Planung auf. Neben dem notwendigen Zusammenarbeiten von einer Vielzahl an Projektbeteiligten wie Bauherr, Architekt, Planer, Ingenieur, Bauunternehmer, Subunternehmer, Behörden, Berater etc. steigt die Komplexität mit der enormen Anzahl an verfügbaren Materialien. Aufgrund neuer Technologien und Produkte muss das Know-how für Herstellung, Reparatur und Recycling von Baumaterialien, Baukomponenten und Systemen ständig erweitert werden [**Hafner2011**].

Ein weiterer komplexitätsfördernder Faktor sind hohe Transaktionskosten. Mit der Steigerung der Komplexität eines Projekts, steigert sich auch die Zeit bis zur Realisierung bzw. Fertigstellung. Lange Planungs- und Bauzeiten sind in vielen Fällen der enormen Komplexität geschuldet. Qualitätsmängel wirken sich durch die vernetzten Zusammenhänge der Faktoren eines Bauwerks vielfältig negativ aus. Weiters ist die Umsetzung von neuen Innovationen aufgrund der Wechselwirkungen im Gesamtsystem schwierig [Trost2006]. Nach einer Umfrage von *PricewaterhouseCoopers*²² verfehlen 75 Prozent aller Großprojekte (im Anlagenbau, Kraftwerksbau und Infrastrukturbau) Kosten- Zeit- und Qualitätsziele [PWC2017].

Um zur Zielerreichung durch die Planung von Bauprojekten beizutragen, müssen Architekten und Planer in der frühen Planungsphase von Gebäuden mit entsprechenden Hilfsmittel bzw. Tools unterstützt werden, um ihre Entscheidungen mit kurzem Zeitaufwand abschätzen zu können und um für die Umsetzung nachhaltigen Bauens sensibilisiert zu werden. Für das spätere Anwendungsbeispiel wird in dieser Arbeit das komplexe System „Gebäude“ auf die Gebäudehülle herunter gebrochen. Auf Grund der zahlreichen Einflussfaktoren, deren Zusammenhänge und deren Einfluss auf die Umsetzung nachhaltigen Bauens kann die Planung der Fassade bzw. der Prozess der Fassadenauswahl als komplexe Entscheidungssituation bezeichnet werden. In der derzeitigen Praxis fehlen zum einen die Zeit sich mit sämtlichen Einflussfaktoren, welche die Umsetzung nachhaltigen Bauens bzw. das Ergebnis eines Gebäudezertifizierungssystems beeinflussen, auseinander zu setzen und zum anderen das notwendige Verständnis für die komplexen Zusammenhänge der einzelnen Faktoren.

²²Unternehmen mit Sitz in Frankfurt am Main. Hauptbranchen der GmbH sind die Wirtschaftsprüfung, die Steuerberatung und die Unternehmensberatung

3.5 Komplexitätsmanagement im Bauwesen

Tabelle 3.1: Einfluss der Fassade auf Nachhaltigkeitskriterien des Gebäudezertifizierungssystems DGNB/ÖGNI

Kriterium	Kriterienname	Fassadenrelevanz
ENV 1.1	Ökobilanz des Gebäudes	x
ENV 1.2	Risiken für die lokale Umwelt	x
ENV 1.3	Verantwortungsbewusste Ressourcengewinnung	x
ENV 2.2	Trinkwasserbedarf und Abwasseraufkommen	
ENV 2.3	Flächeninanspruchnahme	
ENV 2.4	Biodiversität am Standort	
ECO 1.1	Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus	x
ECO 2.1	Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit	x
ECO 2.2	Marktfähigkeit	x
SOC 1.1	Thermischer Komfort	x
SOC 1.2	Innenraumluftqualität	x
SOC 1.3	Akustischer Komfort	x
ENV 1.3	Verantwortungsbewusste Ressourcengewinnung	x
SOC 1.4	Visueller Komfort	x
SOC 1.5	Einflussnahme des Nutzers	x
SOC 1.6	Aufenthaltsqualitäten innen und außen	
SOC 1.7	Sicherheit	x
SOC 2.1	Barrierefreiheit	
TEC 1.2	Schallschutz	x
TEC 1.3	Qualität der Gebäudehülle	x
TEC 1.4	Einsatz und Integration von Gebäudetechnik	x
TEC 1.5	Reinigungsfreundlichkeit des Baukörpers	x
TEC 1.6	Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit	x
TEC 1.7	Immissionsschutz	x
TEC 3.1	Mobilitätsinfrastruktur	
PRO 1.1	Qualität der Projektvorbereitung	x
PRO 1.4	Sicherung der Nachhaltigkeitsaspekte in Ausschreibung und Vergabe	x
PRO 1.5	Dokumentation für eine nachhaltige Bewirtschaftung	x
PRO 1.6	Verfahren zur städtebaulichen und gestalterischen Konzeption	x
PRO 2.1	Baustelle/Bauprozess	
PRO 2.2	Qualitätssicherung der Bauausführung	x
PRO 2.3	Geordnete Inbetriebnahme	x
PRO 2.4	Nutzerkommunikation	x
PRO 2.5	FM-gerechte Planung	x
SITE 1.1	Mikrostandort	
SITE 1.2	Ausstrahlung und Einfluss auf das Quartier	
SITE 1.3	Verkehrsanbindung	
SITE 1.4	Nähe zu nutzungsrelevanten Objekten und Einrichtungen	

Auf Basis des Gebäudezertifizierungssystems DGNB/ÖGNI²³ wurden die fassadenrelevante Nachhaltigkeitskriterien identifiziert. Dabei stellte sich heraus, dass in Summe 26 von 37 Kriterien die Umsetzung der Fassade beeinflussen. Zu erwähnen ist, dass es sich dabei um 26 Kriterien handelt, welche jeweils durch weitere Subkriterien unterteilt sind und die Anzahl an Subkriterien

²³DGNB System - Kriterienkatalog Gebäude Neubau - Version 2018

weit höher ist. In nachfolgender Matrix sind die fassadenrelevanten Kriterien dargestellt.

Um die Wichtigkeit des Bauteils Gebäudehülle und deren Einfluss auf die Gesamtnachhaltigkeit zusätzlich hervorzuheben wird an dieser Stelle auf ein abgeschlossenes Forschungsprojekt der Arbeitsgruppe Nachhaltiges Bauen der TU Graz „UNAB - Umsetzung nachhaltigen Bauens durch optimierte Projektsteuerungsprozesse und integrale Gebäudehüllen“ [UNAB2019] verwiesen. Dadurch soll hervorgehoben werden, dass durch die Planung von Gebäudehüllen die Gebäudeperformance und in weitere Folge die Umsetzung nachhaltigen Bauens stark beeinflusst werden können.

Mit den bisherigen Erläuterungen lässt sich Folgendes zusammenfassen:

Die Bauindustrie ist eine Branche, welche sehr stark mit ökologischen, ökonomischen und sozialen Bereichen interagiert. Durch das Konzept der Nachhaltigkeit wurde bereits festgeschrieben, dass diese Bereiche nicht getrennt voneinander betrachtet werden können. Speziell bei der Planung von Gebäuden kann der größte Einfluss über den gesamten Lebenszyklus auf diese Bereiche ausgeübt werden. Durch zahlreiche zusätzliche Anforderungen ist eine ganzheitliche, lebenszyklusorientierte Planung aufgrund der hohen Komplexität für den Menschen nicht mehr ausreichend bewerkstelligbar. Gründe dafür haben historische Wurzeln und liegen in den historischen Entwicklungen und den eingprägten Denkstrukturen der Menschheit. Durch die ständige Weiterentwicklung der Technik wie zum Beispiel Simulationsmöglichkeiten oder Künstliche Intelligenz gibt es zahlreiche Methoden, welche die auftretende Komplexität wieder handhabbar machen können. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass das systemische Denken in der Baubranche vorangetrieben wird, und demgegenüber stehende Kostenfaktoren - Mehrkosten durch systemische Modellierung und detailliertere Planung - in den Hintergrund gestellt werden. Eine Methode, welche unter den Begriffen System Dynamics, Systems Engineering oder Komplexitätstheorie immer wieder in Verbindung gebracht wird ist die Entscheidungstheorie. In der vorliegenden Masterarbeit wird vor allem detailliert auf multikriterielle Entscheidungsmethoden eingegangen und ein Ansatz für dessen Anwendung in der frühen Planungsphase von Gebäuden zu vorgestellt.

Entscheidungen zu treffen sind alltägliche Bestandteile des Lebens und stellen uns häufig vor Probleme. Entscheidungsprobleme sind oftmals nicht nur von einem Kriterium, sondern einer Vielzahl zusammenhängender Kriterien abhängig. Bei vielen Entscheidungen gibt es keine optimale Lösung bzw. Alternative, welche für alle einfließenden Kriterien passend erscheint. Um diese Entscheidungsprobleme zu lösen wurden und werden noch immer zahlreiche Ansätze und Methoden entwickelt.

Ausgehend von den Arbeiten von *Neumann und Morgenstern* [**Neumann1982**] unterzog sich die Evolution der Entscheidungstheorien einer großen Entwicklung und der gegenwärtige Stand der Technik wird durch ein breites Spektrum von Theorien abgedeckt. Dabei wird die Theorie der Entscheidungsanalyse in die drei Hauptrichtungen normative Theorien, deskriptive Theorien und präskriptive Theorien unterteilt [**Bell1988**], [**Keller1989**],[**Luce1994**].

Normative Entscheidungsmodelle wirken verändernd auf das Entscheidungsverhalten ein, während deskriptive Modelle das Entscheidungsverhalten als gegeben hinnehmen und das Entstehen der Entscheidung wissenschaftlich erläutern. Normative Entscheidungstheorien analysieren wie ein Mensch eine Entscheidung treffen sollte, während deskriptive Theorien untersuchen wie diese Entscheidungen zustande gekommen sind. Eine weitere Unterscheidung normativer Entscheidungsmodelle erfolgt in Form von präskriptiven Entscheidungsmodellen. Bei präskriptiven Entscheidungsmodellen wird zu einem richtigen Verhalten unter vorgegebenen Zielen angeleitet. Präskriptive Theorien können reale Entscheidungsprobleme abbilden und unter Einbeziehung logischer Zusammenhänge in Bezug auf die Zielpräferenzen des Entscheiders eine dem Optimum nahe liegende Entscheidung ermitteln [**Meyer2011**].

Der Großteil der Entscheidungstheorie ist präskriptiv d. h. sie befasst sich mit der Ermittlung der besten zu treffenden Entscheidung unter der Annahme eines idealen Entscheidungsträgers, der vollständig informiert ist und in der Lage ist mit vollkommener Genauigkeit zu rechnen und vollständig rational zu sein. Die praktische Anwendung dieses Ansatzes (wie Menschen tatsächlich Entscheidungen treffen) heißt Entscheidungsanalyse und zielt darauf ab, Werkzeuge, Methoden und Software zu entwickeln, die den Menschen helfen, bessere Entscheidungen zu treffen.

3.6 Entscheidungsprozess

Im Allgemeinen hilft der Entscheidungsprozess den Entscheidungsträgern dabei, Probleme zu lösen, indem sie alternative Entscheidungen prüfen und sich für die beste Vorgehensweise entscheiden. Ein schrittweiser Ansatz ist ein effizienter Weg, durchdachte, informierte Entscheidungen zu treffen, die sich positiv auf die kurz- und langfristigen Ziele auswirken. Der Ablauf eines Entscheidungsprozesses lässt sich anhand bestimmter Schritte darstellen [**Laux2014**]:

1. Beschreibung des Problems

Der erste Schritt, um die richtige Entscheidung zu treffen, besteht darin, das Problem oder die Chance zu erkennen und zu entscheiden, sich damit zu befassen. Voraussetzung für diesen Schritt ist die Erkenntnis, warum die Entscheidung für die beteiligten Stakeholder von Bedeutung ist.

2. Definition der Ziele

Das Treffen von rationalen Entscheidungen ist nur durch eine oder mehrere definierte Zielvorstellungen möglich, mit deren Hilfe die Alternativen bewertet werden können.

3. Erforschung möglicher Handlungsalternativen

Nachdem das Problem eindeutig beschrieben wurde, müssen notwendige Informationen gesammelt werden, damit eine auf Daten und Fakten basierende Entscheidung getroffen werden kann. Dies erfordert ein Werturteil, das bestimmt, welche Informationen für die vorliegende Entscheidung relevant sind.

- **Identifizieren von Restriktionen:** Für alle möglichen Alternativen müssen auch Bedingungen erarbeitet werden. Das sind in gewisser Weise Grundvoraussetzungen (must-haves), eine Alternative erfüllen muss, da es keinen Sinn macht Alternativen gegeneinander abzuwägen, welche ohnehin nicht realisiert werden können bzw. sollen. Durch das kritische Festlegen der Bedingungen kann an dieser Stelle der Entscheidungsprozess vereinfacht werden. Das Festschreiben der Anforderungen ist besonders in der Baubranche äußerst schwierig. Abgesehen davon, dass es nicht möglich ist Anforderungen zu verallgemeinern und auf mehrere Bauwerke anzuwenden, werden Anforderungen durch die Bauherren häufig unpräzise formuliert. Demnach ist eine ausführliche Zieldefinition inklusive dem Festlegen des gewünschten Qualitätsniveaus für sämtliche Bereiche notwendig. Den laienhaften Bauherren müssen demnach Zusammenhänge und Auswirkungen - Synergien und Zielkonflikte - der gewünschten Anforderungen aufgezeigt und erläutert werden.
- **Identifizieren von Alternativen:** Sobald das Problem verstanden und die Ziele definiert wurden, ist es an der Zeit, die verschiedenen Alternativen zu identifizieren. Die Bandbreite der Alternativen ist sehr stark abhängig vom Erfahrungsbereich der Entscheidungsträger. In den meisten Fällen bietet die eigene Erfahrung keine ausreichende Grundlage für das Identifizieren von Alternativen.
- **Prognose der Ergebnisse der Alternativen:** Eine sichere Prognose der Ergebnisse ist aufgrund von Unsicherheiten bzw. Unvollständigkeiten im Informationsstand nicht möglich. Für das Treffen einer rationalen Entscheidung ist jedoch das Abschätzen der Auswirkungen einer gewählten Alternative notwendig.

4. **Auswahl einer Alternative:** Die Auswahl einer Alternative stellt den wichtigsten Schritt eines Entscheidungsprozesses dar. Die Konzipierung dieser Auswahlphase kann sich an

unterschiedlichen Typen von Entscheidungsmodellen orientieren. Der Schwerpunkt in der vorliegenden Masterarbeit stellen die multikriteriellen Entscheidungsmethoden dar.

5. Entscheidungen in der Realisationsphase

Während eine Alternative realisiert wird, treten zahlreiche weitere Entscheidungsprobleme auf. Diese Detailentscheidungen können im Verlauf des späteren Prozesses getroffen werden. Bei der Errichtung eines Gebäudes muss zum Beispiel die Anordnung der Steckdosen nicht im Zuge der Alternativenauswahl berücksichtigt werden. Der gesamte Entscheidungsprozess kann somit als Prozess der Lösung zahlreicher Einzelentscheidungsprobleme bezeichnet werden.

Häufige Probleme innerhalb des Entscheidungsprozesses:

Werden die oben beschriebenen Schritte befolgt, können effektivere Entscheidungen getroffen werden. Jedoch gibt es einige Tücken, auf welche geachtet werden sollten. Dazu zählen folgende auftretende Probleme:

- **Zu viele oder zu wenige Informationen vorhanden**

Das Sammeln relevanter Informationen ist der Schlüssel, wenn man sich dem Entscheidungsprozess nähert. Wichtig ist jedoch zu ermitteln, wie viele Hintergrundinformationen tatsächlich benötigt werden. Zu viele Informationen können dazu führen, dass eine ganzheitliche Betrachtung erschwert wird und intuitive Entscheidungen getroffen werden. Darüber hinaus kann die Nutzung einer einzigen Informationsquelle zu Verzerrungen und Fehlinformationen führen, die auf lange Sicht unerwünschte Auswirkungen haben können.

- **Das Problem wird falsch identifiziert**

In manchen Fällen sind die Probleme, die Entscheidungen betreffen, offensichtlich. Oftmals sind die zu treffenden Entscheidungen komplex und die eindeutige Identifizierung des Problems nicht möglich. Die Durchführung der erforderlichen Recherchen ist daher unabdingbar.

- **Übervertrauen in das Ergebnis**

Die Interpretation der Ergebnisse ist von großer Bedeutung. Aufgrund der auftretenden Unsicherheiten innerhalb des Entscheidungsprozesses sollten ausgewählte Alternativen auf deren Synergien und Zielkonflikte analysiert werden.

3.7 Entscheidungsproblem in der frühen Planungsphase von Gebäuden

Im empirischen Teil der Arbeit werden auf Basis eines praxisrelevanten Entscheidungsproblems die unterschiedlichen multikriteriellen Entscheidungsmethoden getestet und deren Ergebnisse analysiert. Das Entscheidungsproblem wurde dahingehend erarbeitet, dass es eine gewisse Anzahl an Kriterien gibt, welche zum Teil qualitativ und zum Teil quantitativ bewertbar sind. Weiters wurde die Wichtigkeit der Kriterien subjektiv, jedoch für alle multikriteriellen Entscheidungsmethoden immer gleich, gewichtet. Abschließend wurden die ausgewählten Kriterien für sechs gewählte Fassadenszenarien bewertet.

In nachfolgender Tabelle 3.2 werden sämtliche Informationen zum Entscheidungsproblem dargestellt:

Tabelle 3.2: *Beispielhafte Entscheidungskriterien für die Planung einer nachhaltigen Gebäudehülle*

Kriterium	F1	F2	F3	F4	F5	F6	Einheit
Herstellungskosten	120	200	140	250	130	170	€/m ²
Nutzungskosten	2058	2350	2099	4190	3026	3700	€/a
U-Wert	0,16	0,24	0,17	0,35	0,3	0,21	W/(m ² * K)
Rw-Wert	0,33	0,4	0,23	0,43	0,2	0,28	dB
Treibhausgaspotential	0,75	1,57	1	0,93	0,6	1,7	CO ₂ – eq
Modernität Fassade	Ja	Eher ja	Nein	Nein	Ja	Eher nein	-
Tageslichtverhältnisse	Sehr gut	Gut	Schlecht	Gut	Sehr schlecht	Sehr gut	-
Reinigungsfreundlichkeit	Schlecht	Schlecht	Gut	Sehr gut	Sehr schlecht	Gut	-

Innerhalb des empirischen Teils der vorliegenden Masterarbeit werden auch ergänzend notwendigen Informationen zur Anwendung einer bestimmten MCDM - Methoden identifiziert und analysiert, ob diese Informationen im Zuge der frühen Planungsphase vorhanden sind oder nicht.

In nachfolgender Tabelle ist die subjektive Gewichtung der Kriterien dargestellt. Die Gewichtung spiegelt die Präferenz eines fiktiven Entscheidungsträgers wider.

3.7 Entscheidungsproblem in der frühen Planungsphase von Gebäuden

Tabelle 3.3: Gewichtung der Kriterien

Kriterien	Kurzbezeichnung	Einheit	Gewichtung
Herstellungskosten	K1	€/m ²	25%
Nutzungskosten	K2	€/a	13%
U - Wert	K3	W/(m ² *K)	18%
Rw - Wert	K4	dB	16%
Global Warming Potential	K5	CO ₂ -äq	6%
Modernität Fassade	K6	-	4%
Tageslichtverhältnisse	K7	-	16%
Reinigungsfreundlichkeit	K8	-	2%

Die sechs gewählten Fassadenszenarien (Alternativen) werden mit F1 bis F6 bezeichnet. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Anwendung von multikriteriellen Entscheidungsmethoden liegt, werden die Fassadenszenarien (z.B. Aufbauten) nicht detaillierter beschrieben.

4 Multikriterielle Entscheidungsmethoden

Der Themenbereich der multikriteriellen Entscheidungsmethoden (MCDM-Methoden) lässt sich bis ins 18. Jahrhundert zurückverfolgen. Die ersten Arbeiten zu diesen Themenfeldern stammen von *Jean-Charles de Borda*¹ und *Marquis de Condorcet*². Etwa 100 Jahre danach entwickelte *Vilfredo Pareto*³ das Konzept der Dominanz – weiterentwickelt von *Koopmans*⁴ [**Koopmans1951**], welches noch immer eine Grundlage der modernen multikriteriellen Entscheidungsanalyse darstellt [**Zopounidis2010**]. Zwischen 1940 und 1960 wurde von *Neumann*⁵ und *Morgenstern*⁶ [**Neumann1982**], als auch von *Savage*⁷ [**Savage1954**] die Nutzwerttheorie entwickelt, welche eine der Grundlagen der multikriteriellen Entscheidungsmethoden darstellt. In den sechziger Jahren wurden auch die ersten Ansätze in Europa - von *Roy*⁸ [**Roy1968**], dem Gründer der Europäischen Schule multikriterieller Analysen - entwickelt [**Zopounidis2010**].

4.1 Einteilung von MCDM - Methoden

Schon bei der Bezeichnung des Überbegriffs multikriterielle Entscheidungsmethoden herrscht durch die unterschiedlichen Schreibweisen in der Literatur keine Klarheit. Es sollte beachtet werden, dass die Begriffe Multi-criteria Decision Making (MCDM), Multi-criteria Decision Aiding/Analysis (MCDA) und Multiple-Attribute Decision- Making (MADM) manchmal in der Literatur synonym verwendet werden, was zu einiger Verwirrung führen kann [**Abdel2017**]. Im Zuge der untersuchten Literatur kann festgelegt werden, dass MCDM und MCDA als Synonyme verwendet werden (Making = Analysis bzw. Aiding). Keinesfalls jedoch als Synonym zu MCDM/A kann MADM verwendet werden, da MADM sowie MODM (Multiple-Objective Decision Making)

¹1733 - 1799, französischer Mathematiker und Seemann

²1743 - 1794, französischer Philosoph, Mathematiker und Politiker der Aufklärung

³1848 - 1923, italienischer Ingenieur, Ökonom und Soziologe

⁴1910 - 1985, amerikanischer Ökonom und Physiker niederländischer Abstammung

⁵1903 - 1957, US-amerikanischer Mathematiker österreichisch-ungarischer Herkunft

⁶1902 - 1977, österreichisch-amerikanischer Wirtschaftswissenschaftler

⁷1917 - 1971, US-amerikanischer Statistiker und Mathematiker

⁸1934 - 2017, französischer Mathematiker

eine der beiden Hauptklassifizierungen von MCDM/A – Methoden sind. Die Gleichsetzung der englischen Begriffe „Making“ und „Analysis“ findet sich, jedoch auch in den beiden klassifizierten Einteilungen von MCDM/A – Methoden. Das heißt, dass in der Literatur sowohl MADM als auch MADA bzw. MODM als auch MODA gefunden werden. Eine weitere Gleichsetzung von Begriffen findet sich in den Wörtern „Multi“ und „Multiple“. Dazu wurde in der Literatur keine unterschiedliche Bedeutung dieser Begriffe identifiziert, womit diese als Synonyme verwendet werden können. Eine eindeutige Klassifizierung der zahlreichen MCDM – Methoden gestaltet sich aufgrund unterschiedlicher Zuordnungen in der Literatur schwierig. Einer der weit verbreitetsten Klassifizierungsansätze unterscheidet zunächst zwischen Multiple-Objective Decision Making (MODM) Methoden, welche eine unbestimmte Anzahl möglicher Alternativen abdecken kann und Multiple-Attribute Decision Making (MADM) Methoden, die Entscheidungsprobleme mit einer begrenzten Anzahl von Alternativen behandeln [Herva2013]. Dieselbe Einteilung wurde auch von [Pohekar2004] übernommen, als die Anwendung von MCDA Methoden zur nachhaltigen Energieplanung untersucht wurde. [Azapagic:2005aa] klassifizierte die multikriteriellen Entscheidungsmethoden in zwei andere Hauptgruppen. Die erste Gruppe umfasst Programmiermethoden (Programming methods) und die zweite Gruppe umfasst Multi-Attribute-Decision Analyses (MADA) Methoden, welche in den elementaren Ansatz (elementary approach), den wertorientierten Ansatz (value-based approach) und den ausschließenden Ansatz (outranking methods) unterteilt werden können [Wang:2009aa]. Ähnlich klassifizierte [Belton2002] die multikriteriellen Entscheidungsmethoden. Er unterscheidet in die drei Bereiche Wertmessmodelle (value-based approach), Ziel und Referenzmodelle (goal, aspiration and reference-models) und ausschließenden Ansätze (outranking – methods). [Ibanez-Fores:2014aa] erstellte eine detailliertere Klassifizierung und unterteilte die multikriteriellen Entscheidungsmethoden in acht Kategorien. Auch nach [Hwang1981], [Pohekar2004], [Sadok2008] und [Buchholz2009] können multikriterielle Entscheidungsmethoden in die zwei Ansätze Multi-Objective Decision Making (MODM) und Multi-Attribute Decision Making (MADM) unterteilt werden. MODM Methoden werden dabei bei Entscheidungsproblemen mit einer großen Anzahl an Alternativen angewandt. MADM Methoden dagegen bei Entscheidungsproblemen mit einer limitierten Anzahl an Alternativen. Die Klassifizierung in dieser Arbeit stützt sich zunächst auf die Einteilung in die zwei Gruppen MADM und MODM, da diese in der Literatur die häufigere getroffene Einteilung darstellt. Bei der Zuordnung der Methode Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) und der Methode Multi-Attribute Value Theory (MAVT) gibt es unterschiedliche Auffassungen. *Dyer et. al* und *Korhonen et. al* sehen MAUT/MAVT separat von MCDM – Methoden [Dyer1992], [Korhonen1992]. Hingegen ordnen andere Autoren MAUT/MAVT den MCDM Methoden als dritte Kategorie, neben MODM und MADM, zu [Pohekar2004], [Hajkowicz2006], [Sadok2008], [Buchholz2009]. Eine ähnliche Gruppierung von MCDM - Methoden wurde von [Slowinski2002] und [Greco2004] vorgeschlagen, die drei zugrundeliegende Theorien unterscheiden:

4.2 Typen von Entscheidungsproblemen

- Methoden mit Nützlichkeitsfunktion (utility-based methods resp. value-based methods)
- Ausschließende Methoden (outranking methods)
- und Methoden mit Entscheidungsregeln

Die Methoden mit Wert- bzw. Nützlichkeitsfunktionen (utility-based methods) beinhalten Methoden, die die Information in einem Parameter synthetisieren und wurde in den 1970ern von [Keeney1976] eingeführt. Die Outranking - Methoden beinhalten Methoden, die auf Vergleichen zwischen Paaren von Alternativen basieren, um zu verifizieren, ob „Alternative a“ mindestens so gut ist wie „Alternative b“ [Roy1991]. Die Methoden mit Entscheidungsregeln stammen aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz und erlauben die Ableitung eines Präferenzmodells durch die Verwendung von Klassifikation oder Vergleich von Entscheidungsbeispielen [Greco2001].

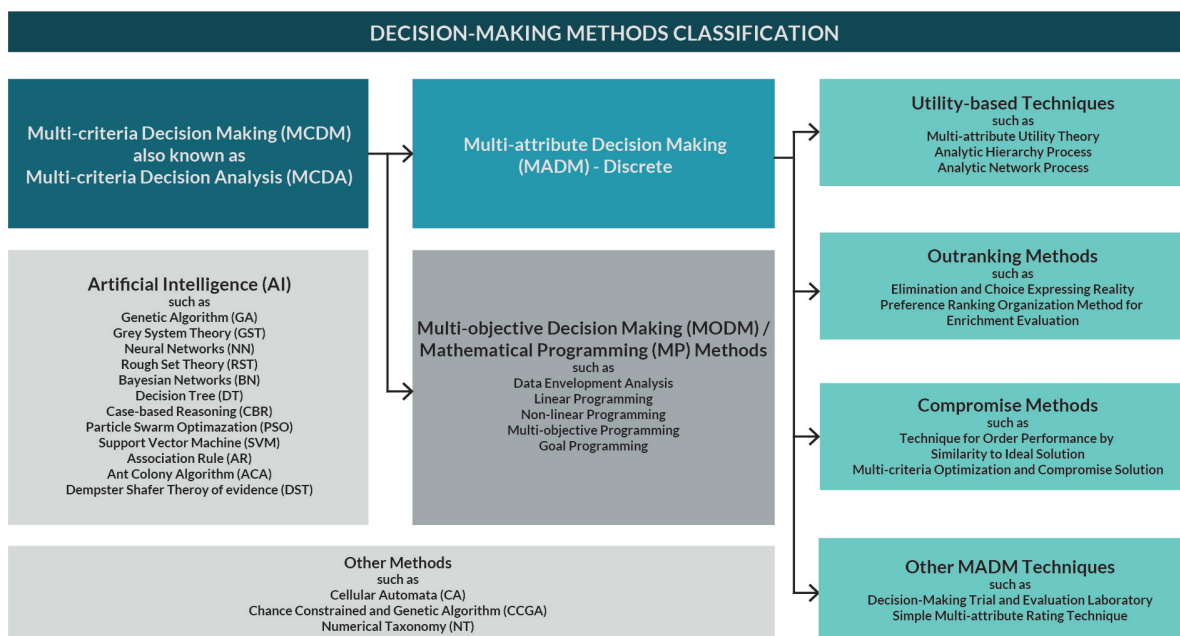


Abbildung 4.1: Einteilung von MCDM-Methoden⁹

4.2 Typen von Entscheidungsproblemen

In der multikriteriellen Entscheidungsanalyse existieren nach Roy vier Problemtypen. Dazu zählen Auswahlprobleme (choice), Sortierungsprobleme (sorting), Reihungsprobleme (ranking) und Beschreibungsprobleme (description) [Roy1981]. Zusätzliche Problemtypen - Beseitigungsproblem (elimination) und Designproblem (design) - wurden von Bana E. Costa [Bana1996] und Keeney [Keeney1992] vorgeschlagen.

⁹Eigene Darstellung in Anlehnung an Multi-criteria Decision-making Methods for Project Portfolio Management: A Literature Review [Danesh:2017aa]

Auswahlproblem: Dies ist der gebräuchlichste Typ von Entscheidungsproblemen. Bei Auswahlproblemen ist es das Ziel, die bestmögliche Alternative zu wählen bzw. die Anzahl der Alternativen auf eine Teilmenge mit unvergleichbaren Alternativen zu reduzieren. Diese Art von Problemformulierung gibt folgende Voraussetzungen vor:

- entweder mit maximaler Genauigkeit die zu empfehlende Entscheidung anzugeben oder
- die Annahme einer Methodik auf der Grundlage eines Auswahlverfahrens (der besten Vorgehensweise) vorschlagen, das für eine mögliche wiederholte Nutzung geeignet ist.

Um die Problemformulierung zu übernehmen, muss versucht werden, die verfügbaren Daten optimal zu nutzen, um Elemente von Alternativen untereinander zu vergleichen. Die Wahl einer einzigen Alternative stellt dabei das Ideal dar.

Eine einzige Alternative zu erhalten kann jedoch für Entscheidungsträger unmöglich erscheinen, da:

- der Charakter von Alternativen revidierbar und/oder transitorisch ist,
- die Leistungswerte, auf denen der Vergleich der Alternativen basiert, ungenügend genau sind,
- die Vielfalt der Wertesysteme, die im Spiel sind, zu Konflikten führen.

In allen Fällen gilt es die Auswahl in dieser Problemformulierung auf eine Teilmenge A' von A so zu reduzieren, dass, für jede Wirkung von A von A' eine Alternative von A' existiert, die genau dieser vorzuziehen (aus Sicht des Entscheiders) ist oder was aus Handlungen besteht, die der Entscheider als zufriedenstellend beurteilt. Wenn A' nicht auf eine einzelne beste Aktion reduzierbar ist, können die Aktionen, welche die Teilmenge enthält, gewählt worden sein, weil sie im Modell äquivalent oder aufgrund der Ungenauigkeit der Daten nicht vergleichbar.

Sortierungsproblem: Dies ist die Problemformulierung, die vorherrscht, wenn versucht wird, die möglichen Alternativen zu sortieren. Alternativen werden in vordefinierte Kategorien sortiert. Diese Methoden sind nützlich für eine wiederholte und/oder automatische Verwendung. Es kann auch zum Screening verwendet werden, um die Anzahl der zu berücksichtigenden Alternativen zu reduzieren.

Reihungsprobleme: Anstatt eine Segmentierungsprozedur zu verwenden, um die Alternativen zu sortieren, kann ein Ranking-Verfahren entwickelt werden, das dazu bestimmt ist, die Alternativen nach einer abnehmenden Präferenzordnung zu ordnen. Alternativen werden in

einer abnehmenden Präferenz angeordnet. Die Reihenfolge kann vollständig oder teilweise vollständig sein, wenn wir unvergleichliche Alternativen berücksichtigen. Anstatt Kategorien von A zu finden, die in Bezug auf die Leistungswerte der darin enthaltenen Handlungen definiert sind, werden die Handlungen untereinander verglichen, um sie in Klassen zu ordnen.

Beschreibungsproblem: Ziel ist es, die Beschreibung von Alternativen und deren Konsequenzen zu unterstützen.

Beseitigungsproblem: Das Eliminationsproblem ist ein besonderer Fall des Sortierungsproblems, bei dem nur zwei Klassen definiert (akzeptiert und eliminiert) werden.

Designproblem: Ziel ist es, eine neue Alternative zu identifizieren oder zu schaffen, die die Ziele und Bestrebungen des Entscheidungsträgers erfüllt.

4.3 Anwendung multikriterieller Entscheidungsmethoden in der Baubranche

Im Zuge der Literaturrecherche wurden zahlreiche Artikel identifiziert, welche MCDM – Methoden für die Auswahl von Baumaterialien und Baumaschinen einsetzen. Bereits bei der Auswahl von Materialien müssen Entscheidungsträger zahlreiche Faktoren (mechanische Eigenschaften, bauphysikalische Eigenschaften, Materialkosten, Dauerhaftigkeit etc.) berücksichtigen. Weitere Aspekte sind nutzerbezogene Kriterien wie optische Kriterien und sensorische Kriterien. Oftmals gibt es mehrere Materialien, welche den Zweck der Entscheidungsträger erfüllen [Jahan2010]. Derzeitige Auswahlmethoden für Materialien scheitern beim Anbieten von Bewertungen, welche auf Nachhaltigkeitsprinzipien aufbauen und an der Reihung und Gewichtung relevanter Beurteilungskriterien. Die sorgfältige Auswahl von nachhaltigen Baumaterialien ist für Planer der einfachste Weg, um sich mit den Anforderungen der Nachhaltigkeitsprinzipien auseinanderzusetzen [Godfaurd2005]. Aufbauend auf diesen Problematiken und den Anforderungen an die Nachhaltigkeit ist es notwendig einen systematischen und ganzheitlichen Auswahlprozess für nachhaltige Baumaterialien zu entwickeln, in welchem die Reihung relevanter Kriterien und die Bewertung von Zielkonflikten von ökologischen, ökonomischen, sozialen und technischen Kriterien ermöglicht wird [Akadiri2012]. Farag nennt drei wichtige Schritte (erste Untersuchung, Entwicklung und Vergleich von Alternativen und Auswahl der optimalen Lösung) bei der Auswahl von Materialien [Farag2008]. Chiner hingegen schlägt fünf Schritte (Planungsdefinition, Analyse der Materialeigenschaften, Untersuchung von alternativen Materialien, Bewertung und Entschei-

dung für die optimale Lösung und Verifizierungstests) für die Materialauswahl vor [**Chiner1988**]. Ein Model für die Auswahl von Baumaterialien, welches Kriterien auf Basis des Drei-Säulen-Nachhaltigkeitsansatzes gewichtet, wurde von *Akadiri* vorgeschlagen [**Akadiri2013**]. Fasst man die oben genannten Ansätze zusammen sind die Untersuchung und anschließende Reihung von Materialalternativen zwei entscheidende Schritte im Zuge der Materialauswahl. Nach *Jahan* sind Multi-Attribute Decision Making Methods (MADM) wie TOPSIS¹⁰, ELECTRE¹¹ und AHP¹² die am häufigsten verwendeten Methoden im Zuge der Materialauswahl [**Jahan2010**].

Auch bei der Auswahl von Baumaschinen werden bereits multikriterielle Entscheidungsmethoden eingesetzt. *Temiz & Calis* untersuchten die richtige Auswahl einer Ausgrabungsmaschine für eine Baustelle und verglichen dabei die Methoden AHP und PROMETHEE¹³ [**Temiz2017**]. Für die Auswahl von Kränen haben *Skibniewski & Chao* bereits 1992 die Anwendung von AHP untersucht [**Skibniewski1992**]. Weiters werden multikriterielle Entscheidungsmethoden auch bei der Auswahl von Betonpumpen angewandt [**Ulubeyli2009**].

Ein weiteres Einsatzgebiet von MCDM – Methoden sind die Themenbereiche Transport und Logistik. *Machharis & Bernardini* untersuchten die Anwendung von multikriteriellen Entscheidungsmethoden in Transportprojekten. Demnach ist von 1985 bis 2012 ein kontinuierlicher Anstieg bei den veröffentlichten Artikeln bei der Anwendung von MCDM - Methoden zu erkennen. Dabei können Transportprojekte zu Subbereichen wie Luftraum/Flugzeug, Fahrrad, Infrastruktur, Wasser, öffentlicher Transport, Zug oder Technologie zugeordnet werden [**Macharis2015**]. Nach *Turcksin* sind die am häufigsten angewandten Entscheidungsmethoden in Transportprojekten MADM - Methoden (AHP, ANP, MAUT¹⁴, MAVT¹⁵), Outranking Methoden (PROMETHEE, ELECTRE) und Regime-Analysen [**Turcksin2011**].

Multikriterielle Entscheidungsmethoden sind auch weit verbreitet im Bereich der Logistik. *Tuzkaya* untersuchte den Einfluss auf die Umwelt von Transportprozessen, *Wang & Chang* wandten multikriterielle Entscheidungsmethoden im Bereich von grüner städtischer Logistik (engl. green urban logistics) an oder *Moghaddam* im Bereich sauberer Energie für energieeffiziente Gebäude [**Tuzkaya2009**], [**Wang2013**], [**Moghaddam2011**].

Ein weiteres Entscheidungsproblem in der Baubranche stellt die Auswahl von Lieferanten dar. Die geeigneten Lieferanten zu finden, die in der Lage sind, dem Käufer die richtigen Qualitätsprodukte und/oder Dienstleistungen zum richtigen Preis, in den richtigen Mengen und zum richtigen Zeitpunkt zu liefern, stellt ein multikriterielles Entscheidungsproblem dar, welches qualitative und quantitative Kriterien umfasst [**Macharis2015**], [**Temiz2017**].

Innerhalb von umweltbezogenen Themenbereichen wurden MCDM – Methoden im Abfall-

¹⁰Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution - siehe 6.9

¹¹Elimination Et Choix Traduisant la REalité - siehe 6.4

¹²Analytic Hierarchy Process - siehe 6.1

¹³Preference ranking organization method for enrichment evaluation - siehe 6.6

¹⁴Multi-attribute utility theory

¹⁵Multi-attribute value theory

4.3 Anwendung multikriterieller Entscheidungsmethoden in der Baubranche

management, Energiemanagement, Abwasserbehandlung, Wasserqualität oder Luftqualität eingesetzt [Herva2013]. Proaktive Umweltmanagementinitiativen wie die Vermeidung von Umweltverschmutzung, sauberere Produktion und Nachhaltigkeit sind von Natur aus mehrzielige Prozesse, die gemeinsame Überlegungen zu ökologischen, industriellen, wirtschaftlichen und sozialen Kriterien in allen Phasen der Entscheidungsfindung erfordern [Khalili2013]. Huang führte eine umfangreiche Literaturrecherche zur Anwendung von multikriteriellen Entscheidungsmethoden im Themenbereich der Umweltwissenschaften durch. Dabei untersuchten sie über 300 Artikel im Zeitraum von 2000 bis 2009. Die Ergebnisse verzeichneten einen signifikanten Anstieg in der Anwendung von multikriteriellen Entscheidungsmethoden über sämtliche Bereiche der Umweltwissenschaften (Abfallmanagement, Wasserqualität, Luftqualität, Energie, natürliche Ressourcen). Abschließend wurde auch die Verteilung der Anwendung von multikriteriellen Entscheidungsmethoden nach der geographischen Lage (Kontinente) untersucht [Huang2011]. Multikriterielle Entscheidungsmethoden kommen auch bei dem Themenfeld des Abfallmanagements zum Einsatz. Das Abfallmanagement in Gemeinden ist ein komplizierter Prozess, welcher zahlreiche umweltbedingte, ökonomische und soziale Kriterien umfasst. In weiterer Folge sind zahlreiche Stakeholder wie die Regierung, Gemeinden, Industrie, Experten und/oder die breite Öffentlichkeit involviert. Multikriterielle Entscheidungsmethoden helfen den Stakeholdern dabei die in Wechselwirkung stehenden Kriterien zu bewerten, ihre eigenen Präferenzen zu kommunizieren und unterschiedliche Strategien zu reihen [Soltani2015]. Soltani identifizierte für Abfallmanagementprobleme die am meisten angewandten Methoden. Demnach ist die Methode AHP die meist angewandte Methode. Gefolgt von Methoden wie ELECTRE und TOPSIS. PROMETHEE wird als neue aufkommende Methode, welche bereits umfangreiche Anwendung findet, beschrieben [Soltani2015].

Nach Korhonen können ökologische Probleme mit einer endlichen Anzahl an Alternativen beschrieben werden, wodurch oftmals MADM - Methoden Anwendung finden. Nach Herva & Roca sind die am meisten angewandten Entscheidungsmethoden bei ökologischen Problemen PROMETHEE, ELECTRE, AHP und ANP¹⁶ [Korhonen1992], [Herva2013].

Die Methode der Ökobilanz kann verwendet werden, um Entscheidungsalternativen (z.B. Produkte, Standorte, Projekte) auf der Grundlage verschiedener Umweltindikatoren zu bewerten. Eine weitere methodische Herausforderung für Umweltmanager besteht jedoch darin, aus den zahlreichen bewerteten Indikatoren ein umfassendes Urteil über die „Umweltleistung“ zu erstellen. Eine entscheidende Rolle bei der Bewertung der Umweltleistung bzw. bei der Gewichtung der zugrundeliegenden Indikatoren bzw. Alternativen spielt die Unsicherheit von Inputparamter. Diese Datenunsicherheit ist beim End-point-Ansatz größer als beim Mid-point-Ansatz. Hertwich empfiehlt die Beibehaltung des Mid-point-Ansatzes, weist aber darauf hin, dass für „Urteile über Tatsachen“ der End-point-Ansatz berücksichtigt werden sollte [Bengtsson2008],

¹⁶Analytic Network Process - siehe 6.2

[**Hertwich2001**]. Diese Herausforderung kann mit Methoden der multikriteriellen Entscheidungsanalyse angegangen werden, die konzeptuell in das Ökobilanz-Framework und Standards als „Gewichtung“ eingeführt werden.

Saparauskas überprüfte mehrere Gebäudebewertungssysteme in verschiedenen Ländern und konzipierte ein multikriterielles Bewertungssystem, um zwei Bauprojekte basierend auf nachhaltigem Design und nachhaltigen Materialien in einem realen Fall zu bewerten [**Saparauskas2003**]. Eine Analyse nachhaltiger Bauprojekte wurde auch in Litauen durchgeführt, indem ein Indikatorensystem mit sechs sozio-ökonomischen und ökologischen Indikatoren eingeführt wurde. In dieser Studie generierten die Methoden TOPSIS und SAW¹⁷ eine Reihung für den Nachhaltigkeitsindex [**Zavadskas2014**]. *Medineckiene* haben AHP und SAW in einem Forschungsartikel über nachhaltiges Bauen unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Gebäudes auf die Umwelt angewendet [**Medineckiene2010**].

Im Bereich des Energiesektors wurde der Einsatz von MCDM – Methoden von zahlreichen Autoren analysiert [**Kurka2013**], [**Theodorou2010**], [**Kahraman2009**], [**Maurin2013**], [**Upham2007**], [**Diakoulaki2007**], [**Koene2007**], [**Papadopoulos2008**]. Hervorgehoben sei die Arbeit von *Mardani* In diesem Artikel wurden 196 veröffentlichte Arbeiten von 1995 bis 2015 in 72 wichtigen Fachzeitschriften für Energiemanagement ausgewählt und geprüft. Alle veröffentlichten Arbeiten wurden in 13 verschiedene Bereiche unterteilt: Umweltverträglichkeitsprüfung, Abfallwirtschaft, Nachhaltigkeitsbewertung, erneuerbare Energien, Energieverträglichkeit, Landmanagement, Umweltmanagement, Wasserressourcenmanagement, Klimawandel, strategische Umweltprüfung, Bau- und Umweltmanagement und andere Energiemanagement-Bereiche [**Mardani2017**]. Auch die Anwendung in der frühen Planungsphase von Bauvorhaben wird in einigen Arbeiten erläutert. Baumanagemententscheidungen beinhalten typischerweise mehrere widersprüchliche Aspekte, die berücksichtigt werden müssen. Diese Entscheidungssituationen können als multikriterielle Optimierungsprobleme formuliert werden, bei denen die verschiedenen Aspekte eines Bauprojekts die gleichzeitig zu optimierenden, widersprüchlichen Kriterien darstellen. Daher kann die Anwendung einer multikriteriellen Optimierung in dieser frühen Phase zu erheblichen Einsparungen bei Bauvorhaben führen [**Grierson2008**], [**Wang2005**], [**Rafiq2011**].

Im Zusammenhang mit der Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden haben Studien gezeigt, dass Architekten und Bauingenieure aufgrund mehrerer Unsicherheiten im Auswahlprozess große Schwierigkeiten haben, die in Neubauprojekten zu implementierenden Zertifizierungspunkte auszuwählen [**Ofori2012**], [**Sulochana2012**], [**Cheng2015**], [**Ma2016**], [**Azhar2011**]. Der Gebäudezertifizierungsprozess beinhaltet detaillierte Anforderungen und Spezifikationen, die zu zusätzlichen Aufgaben für das Projektteam führen, die den Komplexitätsgrad für den gesamten Bauprozess erhöhen [**Robichaud2011**], [**Gultekin2013**]. *Sulochana* beabsichtigte ein Entscheidungsfindungsmodell unter Verwendung von AHP und Monte-Carlo-Simulationstechniken zu

¹⁷Simple Additive Weighting - siehe 6.7

4.3 Anwendung multikriterieller Entscheidungsmethoden in der Baubranche

entwickeln, die auf mehreren Kriterien basieren, wie z.B. Projektkostenschwankungen, Umweltauswirkungen, Auswirkungen auf den Zeitplan und die Bauproduktivität [**Sulochana2012**]. *Attallah* entwickelte eine MCDM - Methode zur Einstufung von Green Building - Zertifikaten nach der ELECTRE - Methode [**Attallah2017**].

Die Anwendung von MCDM – Methoden in der Baubranche wird bereits für zahlreiche Themenbereiche des Bauingenieurwesens erforscht. Die tatsächliche Anwendung in der Praxis steht jedoch noch aus. Dies begründet sich darauf, dass im Zuge der Literaturrecherche nur eine minimale Anzahl der Publikationen an Case Studies angewandt wurden. Mit der detaillierten Untersuchung ausgewählter MCDM – Methoden (siehe Kapitel Systematische Literaturrecherche) werden in dieser Arbeit diese Methoden an einem praxisrelevanten Entscheidungsproblem analysiert und gegenübergestellt. Im Zuge der Interpretation der Ergebnisse soll die praxisgerechte Anwendung von MCDM – Methoden in der frühen Planungsphase von Gebäuden überprüft werden.

5 Systematische Literaturrecherche

Die Abbildung des derzeitigen Forschungsstandes der betrachteten Methoden wurde mithilfe einer systematischen Literaturrecherche (SLR) durchgeführt. Erläuterungen zur Durchführung der SLR sowie zum beinhalteten Snowball-Ansatz finden sich in [Higgins:2011aa], [Wohlin:2014aa]. Die Literaturrecherche wurde hinsichtlich der Frage nach der Anwendung der Methoden in der Baubranche und im Speziellen nach der Anwendung im Nachhaltigen Bauen eingeschränkt.

5.1 Auswahl der Keywords

Für eine Erstausswahl von MCDM-Methoden wurden jene Methoden in Anlehnung an [Jato2014] ausgewählt. Für die in dem Artikel angeführten MCDM-Methoden wurde jeweils eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Die Schlüsselwörter der Methoden wurden lediglich in ausgeschriebener Form angegeben, da die Annahme getroffen wurde, dass in jedem Artikel, in welchem die betrachteten Methoden in der notwendigen Tiefe, wie sie zur Beantwortung der Forschungsfragen erforderlich sind, nicht nur in der abgekürzten Form, also z.B. AHP für Analytic Hierarchy Process, vorkommen, sondern ausgeschrieben werden. Wie in der Tabelle ersichtlich, wurden nur Journals in englischer Sprache und einem Zeitraum von 2010 bis 2018 beachtet. In nachfolgender Tabelle 5.1 sind die Schlüsselwörter, wie sie zur Literaturrecherche verwendet wurden, angeführt.

Tabelle 5.1: *Schlüsselwörter der Literaturrecherche*

----- Methode		Schlüsselwörter	Printmedium	Zeitraum	Sprache
z.B.: Analytic Hierarchy Process	+	construction industry	Journal	2010 - 2018	Englisch
z.B.: Analytic Network Process	+	construction sector	Journal	2010 - 2018	Englisch
z.B.: Analytic Network Process	+	construction field	Journal	2010 - 2018	Englisch
Methode	+	construction branch	Journal	2010 - 2018	Englisch
Methode	+	sustain* building*	Journal	2010 - 2018	Englisch
Methode	+	sustain* construction*	Journal	2010 - 2018	Englisch
Methode	+	sustain* decision*	Journal	2010 - 2018	Englisch
Methode	+	sustain* assessment	Journal	2010 - 2018	Englisch
Methode	+	product stage	Journal	2010 - 2018	Englisch
Methode	+	construction stage	Journal	2010 - 2018	Englisch
Methode	+	use stage	Journal	2010 - 2018	Englisch
Methode	+	end of life stage	Journal	2010 - 2018	Englisch

5.2 Literatur zu multikriteriellen Entscheidungsmethoden

Bevor die Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche für die einzelnen betrachteten Methoden dargestellt werden, folgt in Abbildung 5.1 eine Gegenüberstellung aller Methoden, welche in „A review of application of multi-criteria decision making methods in construction“ [Jato2014] berücksichtigt wurden. Dabei ist ersichtlich welche Methoden anhand der ausgewählten Schlüsselwörter bei der Literaturrecherche am häufigsten adressiert wurden. Diese Darstellung lässt darauf schließen, dass vor allem die Methoden Monte-Carlo Simulation (MCS), Analytic Hierarchy Process (AHP), Fuzzy Sets (FSs), Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) und Data Envelopment Analysis (DEA) in der Baubranche, zumindest in der Forschung, größere Relevanz aufweisen als die anderen betrachteten Methoden.

5.2 Literatur zu multikriteriellen Entscheidungsmethoden

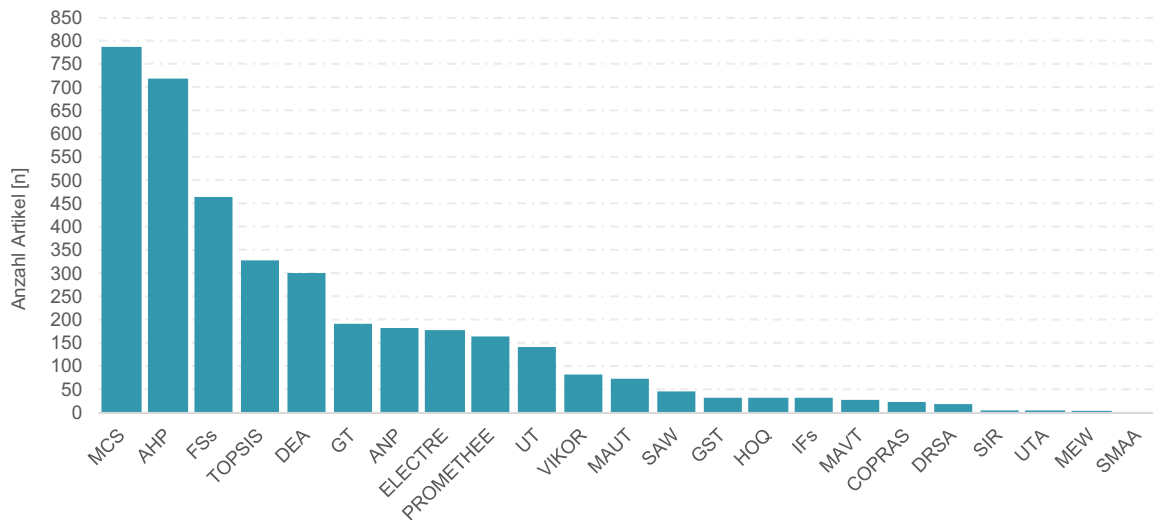


Abbildung 5.1: Anzahl recherchierter Artikel im Zuge der systematischen Literaturrecherche der Methoden ohne Ausschlusskriterien

Im Zuge der weiteren Betrachtungen innerhalb der vorliegenden Masterarbeit wurden gewisse Einschränkungen der untersuchten Methoden innerhalb der Literaturrecherche vorgenommen. Dabei wurden Game Theory (GT), Utility Theory (UT), Multi-Attribute Utility Theory (MAUT), Game Set Theory (GST), House of Quality (HOQ), Multi-Attribute Value Theory (MAVT) und Dominance Rough Set Theory (DRSA) ausgeschlossen. Diese Begriffe stellen zum Teil Überbegriffe dar, welche MCDM-Methoden umfassen. Analytic Hierarchy Process ist zum Beispiel eine Methode innerhalb des Bereichs MAUT. Utility Additives (UTA) ist eine Methode von UT. GT, GST, HOQ und DRSA sind wiederum Methoden, welche innerhalb einer MCDM-Methode angewendet werden können und keine eigenständigen MCDM-Methoden darstellen. Weiters werden die Methoden Monte-Carlo Simulation (MCS), Fuzzy Sets (FSs) and Intuitionistics Fuzzy Sets (IFs) nicht weiter untersucht. Diese Methoden stellen aus Sicht des Autors keine multikriteriellen Entscheidungsmethoden im engeren Sinne dar, sondern sind vielmehr Methoden, welche man innerhalb von MCDM-Methoden anwenden kann, um beispielsweise Risikoanalysen von Parametern durchzuführen bzw. linguistische Variablen in numerische Werte umzuwandeln. Ein weiteres Ausschlusskriterium stellen MODM-Methoden dar (DEA und SMAA), da der Fokus in dieser Arbeit nicht auf Entscheidungsmethoden mit mehreren Zielen gelegt wurde.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Anzahl der gefundenen Artikeln zu den ausgewählten Methoden innerhalb der systematischen Literaturrecherche dargestellt. Inhaltliche Erläuterungen zu den einzelnen Methoden folgen in Kapitel 6.

5.2.1 Analytic Hierarchy Process (AHP)

Im Zuge der systematischen Literaturrecherche wurden ca. 720 Artikel mit den ausgewählten Schlüsselwörtern im Zeitraum von 2010 bis 2017 gefunden. Nach der Eingrenzung der gefundenen Artikel anhand des Titels und der notwendigen Tiefe zur Beantwortung der Forschungsfragen gab es noch ca. 160 relevante Artikel. Nach dem Screening von Abstract und Conclusion stehen 43 Artikel zur Verfügung, welche zur Beantwortung der Forschungsfragen herangezogen werden. Der Trend der entstandenen Publikationen ist seit dem Jahr 2010 bis 2016 gleichmäßig steigend. Im Jahr 2017 und 2018 gab es im Vergleich zum Jahr 2016 einen Rückgang bei der Anzahl der publizierten Artikel.

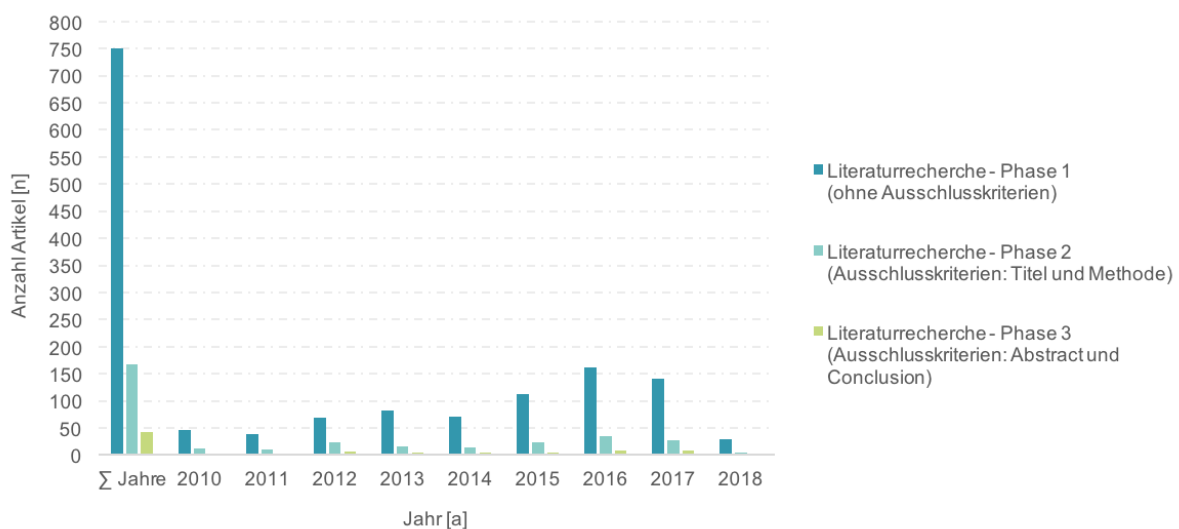


Abbildung 5.2: Übersicht systematische Literaturrecherche AHP

5.2.2 Analytic Network Process (ANP)

Für die Methode ANP wurden im Zuge der systematischen Literaturrecherche rd. 180 Artikel gefunden. Für die finale Bearbeitung innerhalb der vorliegenden Masterarbeit werden 26 Artikel herangezogen. Von 2010 bis 2015 ist ein gleichmäßig steigender Trend bei den entstandenen Publikationen erkennbar. Im Jahr 2016 verzeichnete sich ein Rückgang, welcher im Jahr 2017 wieder auf den Höchststand an publizierten Artikel aus dem Jahr 2015 ansteigt. Ein weiterer Rückgang kann im Jahr 2018 identifiziert werden.

5.2 Literatur zu multikriteriellen Entscheidungsmethoden

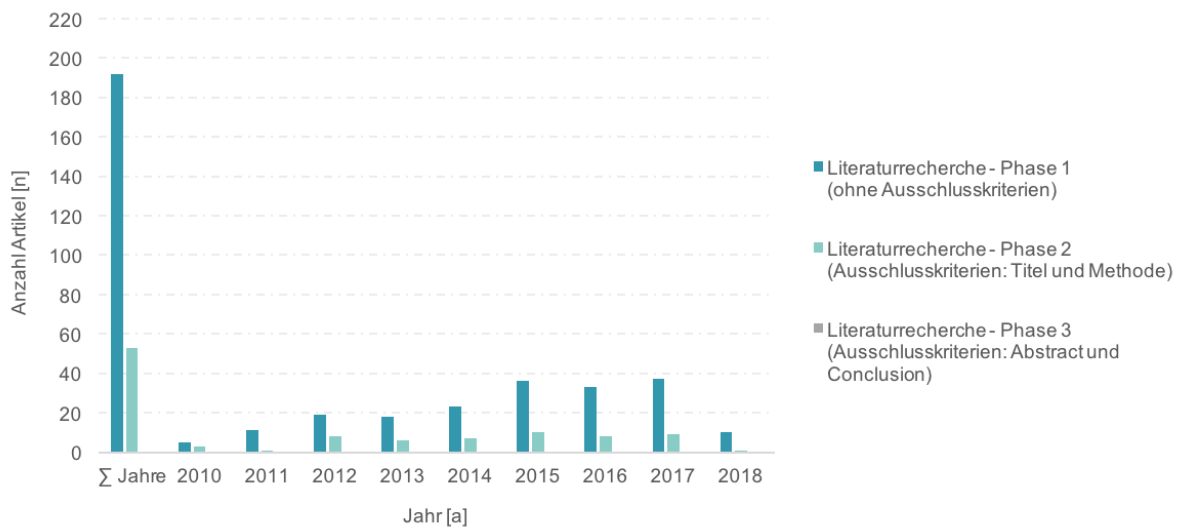


Abbildung 5.3: Übersicht systematische Literaturrecherche ANP

5.2.3 Complex proportional assessment (COPRAS)

Wie in Abbildung 5.1 ersichtlich befindet sich die Methode COPRAS im hinteren Drittel bei der Gesamtgegenüberstellung aller betrachteten Methoden. Mit einer Anzahl von rd. 25 recherchierten Artikel im Zuge der systematischen Literaturrecherche werden zur finalen Bearbeitung zu Beantwortung der Forschungsfragen 8 Artikel herangezogen. Die zunächst steigende Anzahl der Publikationen von 2010 bis 2013 sinkt in den Jahren 2014 und 2015 wieder ab. Ab dem Jahr 2016 bis 2017 verzeichnet sich wieder ein Anstieg bei den recherchierten Publikationen, welche im Jahr 2018 wieder auf null Publikationen fällt.

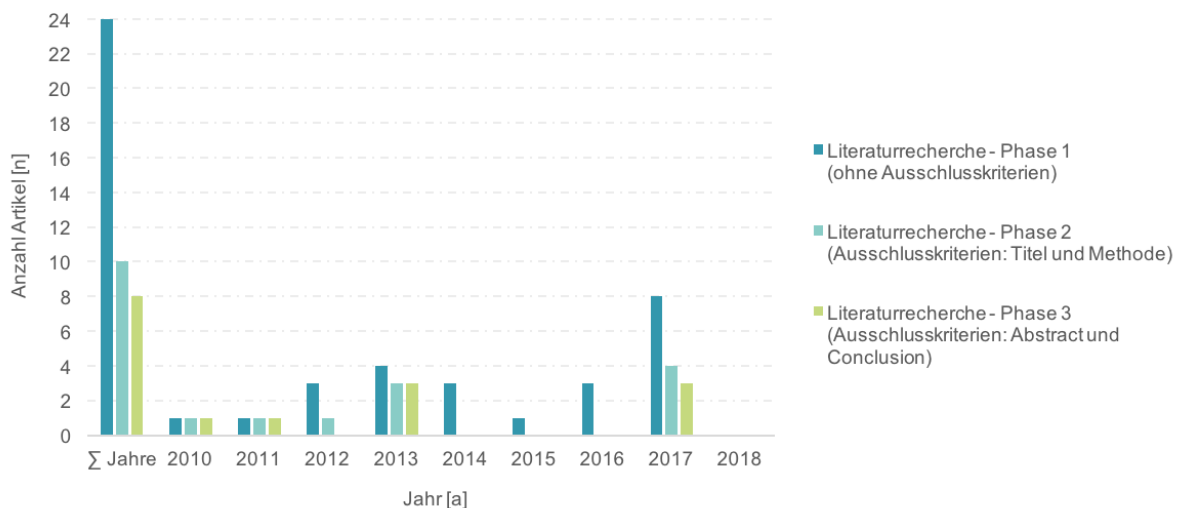


Abbildung 5.4: Übersicht systematische Literaturrecherche COPRAS

5.2.4 Elimination et choix traduisant la réalité (ELECTRE)

Innerhalb der systematischen Literaturrecherche wurde für die Methode ELECTRE mit den ausgewählten Schlüsselwörtern aus Tabelle 5.1 ca. 185 Publikationen identifiziert. Damit befindet sich diese Methode im oberen Drittel der Gesamtgegenüberstellung aller Methoden (siehe Abbildung 5.1). Die Höchstanzahl an publizierten Artikeln im Jahr 2012 wurde nach einem leichten Rückgang im Jahr 2013 im Jahr 2016 deutlich überschritten. Im Jahr 2017 verzeichnete sich wieder ein leichter und im Jahr 2018 ein starker Rückgang bei den recherchierten Artikeln. Zur weiteren Bearbeitung in Kapitel 6 werden 12 Artikel herangezogen.

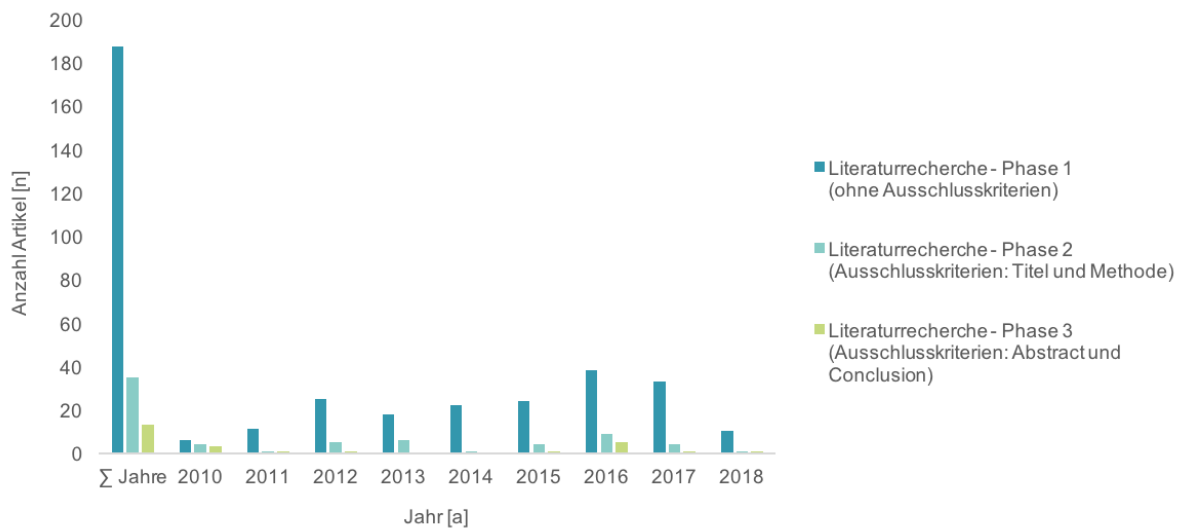


Abbildung 5.5: Übersicht systematische Literaturrecherche ELECTRE

5.2.5 Multiplicative exponential weighting (MEW)

Für die Methode MEW wurden lediglich 4 Artikel mit den verwendeten Keywords identifiziert. Im Zuge der Ausschlussphasen wurden diese Artikel als nicht relevant eingestuft. In Kapitel 6 wird die Methode jedoch trotzdem für die Lösung des Entscheidungsproblems im Zuge des Anwendungsbeispiels herangezogen.

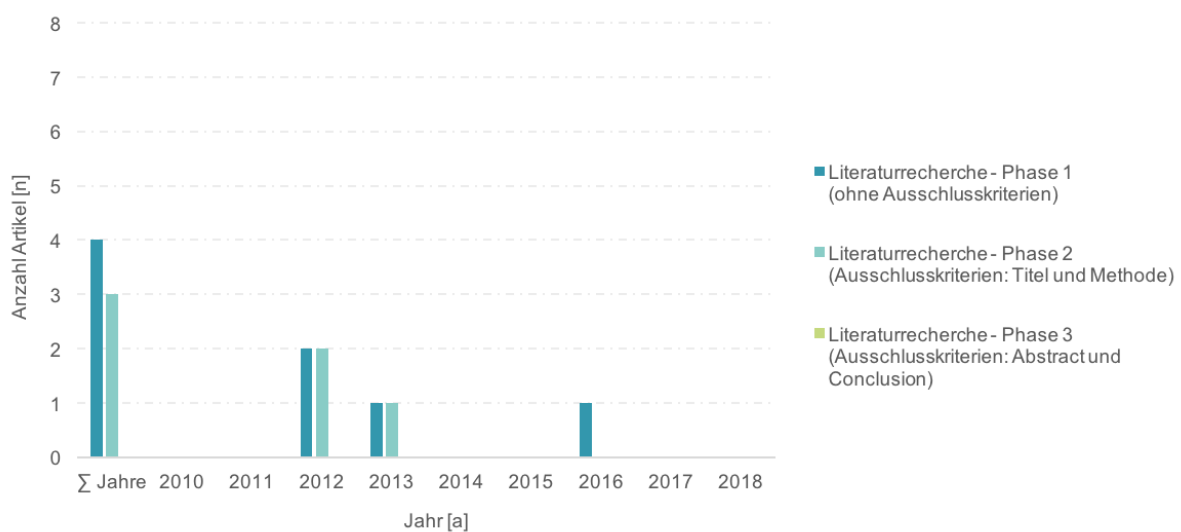


Abbildung 5.6: Übersicht systematische Literaturrecherche MEW

5.2.6 Preference ranking organization method for enrichment of evaluations (PROMETHEE)

Innerhalb der systematischen Literaturrecherche wurden für die Methode PROMETHEE mit den ausgewählten Schlüsselwörtern aus Tabelle 5.1 ca. 165 Publikationen identifiziert. Damit reiht sich diese Methode im oberen Drittel der Gesamtgegenüberstellung aller Methoden (siehe Abbildung 5.1) ein. Ab dem Jahr 2011 zeichnet sich ein kontinuierlicher Anstieg an Veröffentlichung im Bereich der Bauindustrie bzw. im Bereich des Nachhaltigen Bauens ab. Die Höchstanzahl an entstandenen Artikeln liegt im Jahr 2016. Im Jahr 2017 verzeichnete sich ein leichter und im Jahr 2018 ein starker Rückgang bei den recherchierten Artikeln. Zur weiteren Bearbeitung in Kapitel 6 werden 11 Artikel herangezogen.

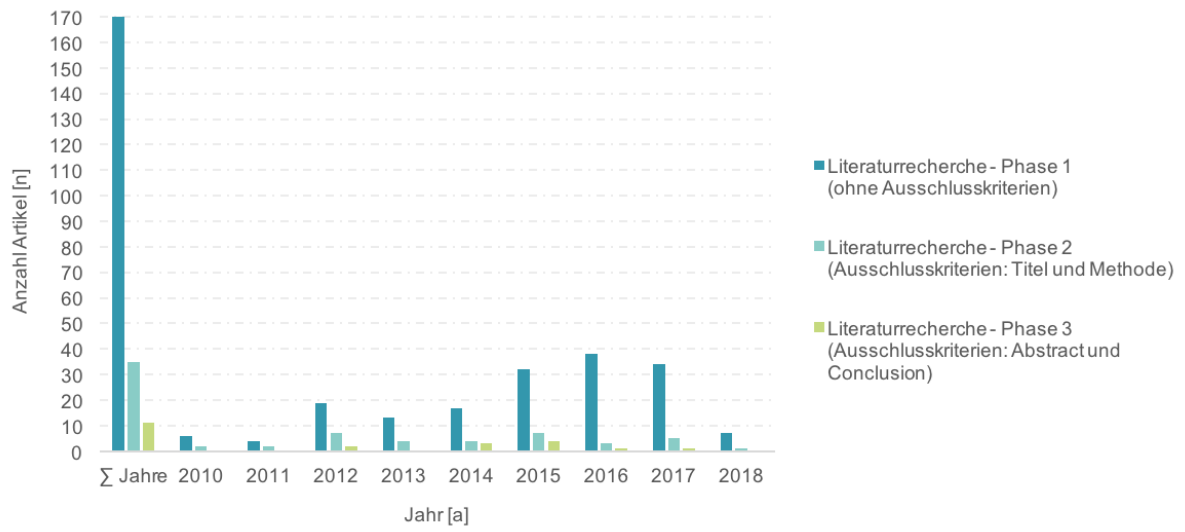


Abbildung 5.7: Übersicht systematische Literaturrecherche PROMETHEE

5.2.7 Simple Additive Weighting (SAW)

Im Zuge der systematischen Literaturrecherche wurden mit den ausgewählten Schlüsselwörtern 45 Artikel im Zeitraum von 2010 bis 2018 recherchiert. Der Verlauf der publizierten Artikel, welche die MCDM-Methode SAW adressieren kann von 2010 bis 2012 als steigend interpretiert werden. Im Jahr 2013 gibt es einen Sprung auf eine niedrigere Anzahl an Artikeln als in den Jahren zuvor, jedoch ist im Laufe der Jahre 2014, 2015 und 2016 wieder ein Anstieg der publizierten Artikel abzulesen. Im Jahr 2017 gibt es wieder einen Rückgang bei der Anzahl der gefundenen Artikel. Im Jahr 2018 wurden keine relevanten Publikationen auf Basis der ausgewählten Schlüsselwörter identifiziert. In Abbildung 5.8 wird die Anzahl der recherchierten Artikel mit den ausgewählten Schlüsselwörtern im Zuge der systematischen Literaturrecherche über die Jahre von 2010 bis 2018 dargestellt.

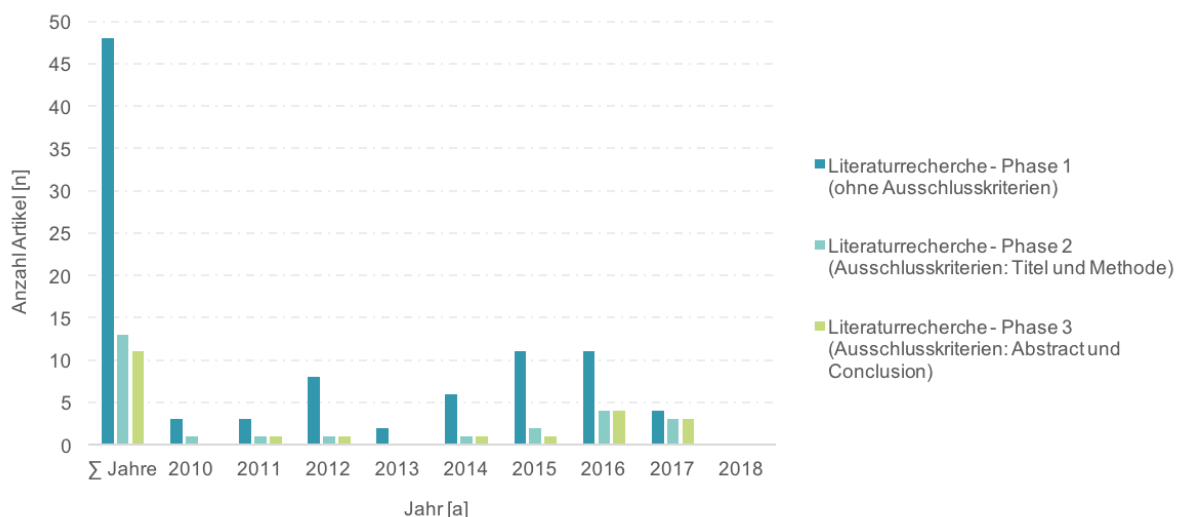


Abbildung 5.8: Übersicht systematische Literaturrecherche SAW

5.2.8 Superiority and Inferiority Ranking (SIR)

Im Zuge der systematischen Literaturrecherche wurden mit den ausgewählten Schlüsselwörtern 6 Artikel im Zeitraum von 2010 bis 2017 identifiziert. Im Allgemeinen kann über eine gleichmäßige Erscheinung von Artikeln über die Jahre 2010 bis 2012 gesprochen werden. Im Jahr 2013, 2015 und 2016 wurden keine Artikel mit den ausgewählten Schlüsselwörtern identifiziert. Der Höchststand an Artikel (zwei Artikel) wurde im Jahr 2014 erreicht. Für eine engere Auswahl in Bezug auf die Relevanz für die vorliegende Masterarbeit kamen vier Artikel in Frage, welche

detailliert in Kapitel 6 betrachtet werden. In Abbildung 5.9 wird die Anzahl der publizierten Artikel mit den ausgewählten Schlüsselwörtern im Zuge der systematischen Literaturrecherche über die Jahr von 2010 bis 2018 dargestellt.

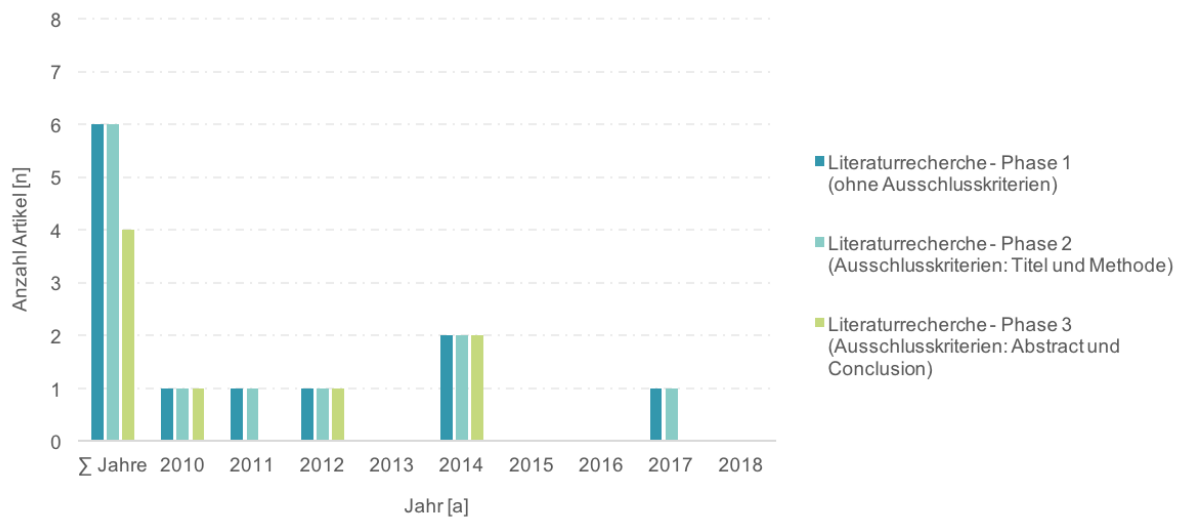


Abbildung 5.9: Übersicht systematische Literaturrecherche SIR

5.2.9 Technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)

Innerhalb der systematischen Literaturrecherche wurden für die Methode TOPSIS mit den ausgewählten Schlüsselwörtern aus Tabelle 5.1 ca. 340 Publikationen recherchiert. Damit befindet sich diese Methode im oberen Drittel der Gesamtgegenüberstellung aller Methoden (siehe Abbildung 5.1). Ab dem Jahr 2011 zeichnet sich ein kontinuierlicher Anstieg (Ausnahme Jahr 2014) an Veröffentlichung im Bereich der Bauindustrie bzw. im Bereich des Nachhaltigen Bauens ab. Die Höchstanzahl an publizierten Artikeln liegt im Jahr 2017. Im Jahr 2018 verzeichnet sich ein Rückgang bei den entstandenen Publikationen Zur weiteren Bearbeitung in Kapitel 6 werden 35 Artikel herangezogen.

5.2 Literatur zu multikriteriellen Entscheidungsmethoden

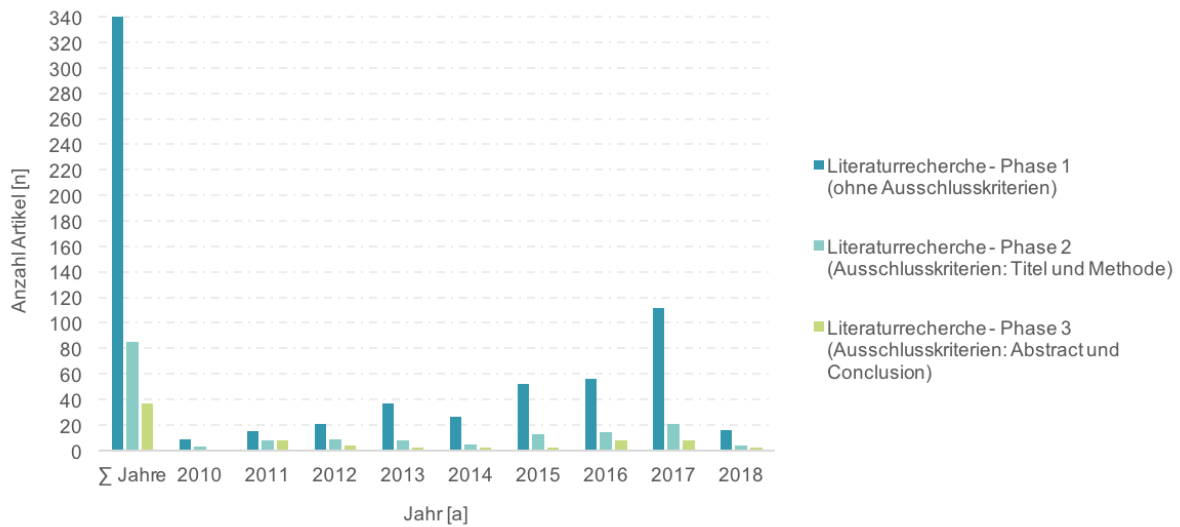


Abbildung 5.10: Übersicht systematische Literaturrecherche TOPSIS

5.2.10 Utilités additives (UTA)

Die Methode UTA wird verhältnismäßig wenig im Bereich der Baubranche angewandt. Mit einer Gesamtanzahl von 5 identifizierten Publikationen im Zuge der systematischen Literaturrecherche liegt die Methode in der Gegenüberstellung mit allen betrachteten MCDM-Methoden ohne Einschränkungen an drittletzter Stelle (siehe Abbildung 5.1). Für eine weitere Betrachtung werden zwei Artikel mit besonderer Relevanz zur Bauindustrie herangezogen.

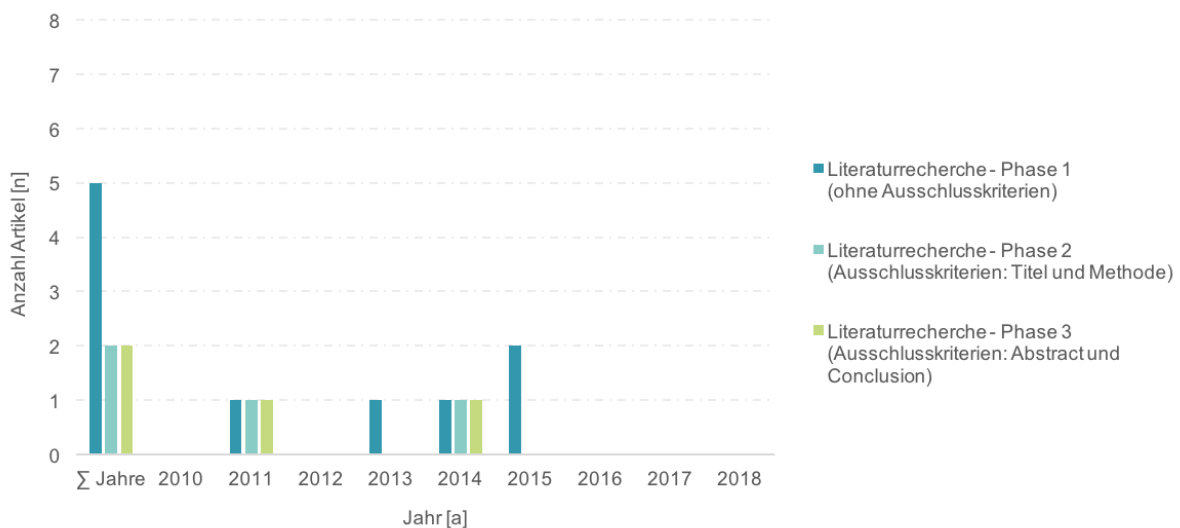


Abbildung 5.11: Übersicht systematische Literaturrecherche UTA

5.2.11 Visekriterijumska Optimizacija I kompromismo resenje (VIKOR)

Innerhalb der systematischen Literaturrecherche wurde für die Methode VIKOR mit den ausgewählten Schlüsselwörtern aus Tabelle 6.1 ca. 80 Publikationen recherchiert. Damit liegt diese Methode im Mittelfeld der Gesamtgegenüberstellung aller Methoden (siehe Abbildung 5.1). Nach der erreichten Höchstanzahl an entstandenen Artikel im Jahr 2016 gab es im Jahr 2017 einen leichten Rückgang bei den publizierten Artikel. Im Jahr 2018 wurden keine relevanten Publikationen auf Basis der ausgewählten Schlüsselwörter identifiziert. Zur weiteren Bearbeitung in Kapitel 6 werden 12 Artikel herangezogen.

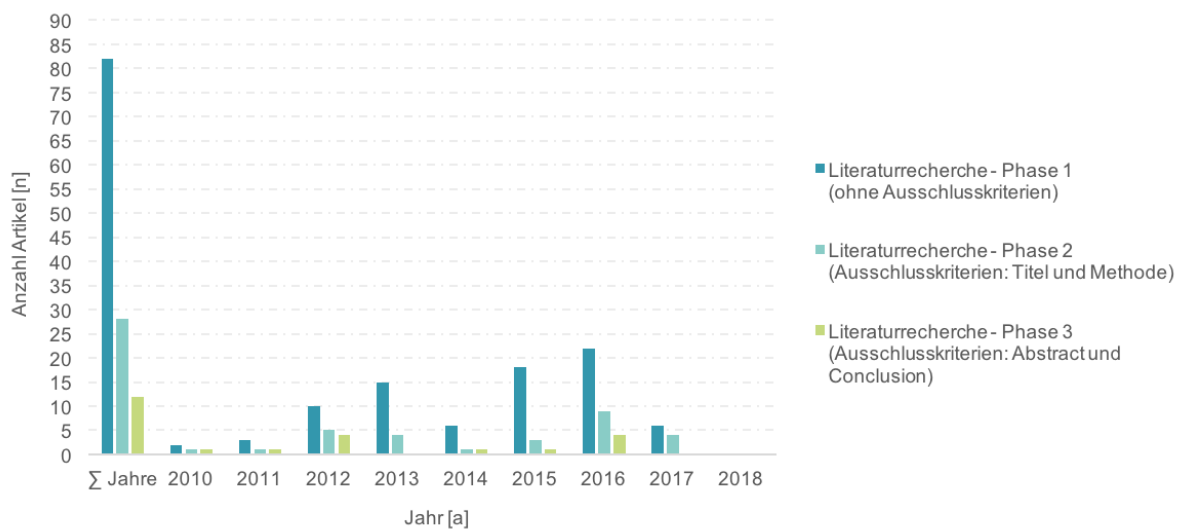


Abbildung 5.12: Übersicht systematische Literaturrecherche VIKOR)

Zusammenfassend werden die berücksichtigten Methoden anhand der Anzahl der recherchierten Publikationen nach den Ausschlussphasen in Abbildung 5.13 dargestellt und ergibt ein erstes Ergebnis in Bezug auf die Anwendung von MCDM-Methoden in der Baubranche.

5.2 Literatur zu multikriteriellen Entscheidungsmethoden

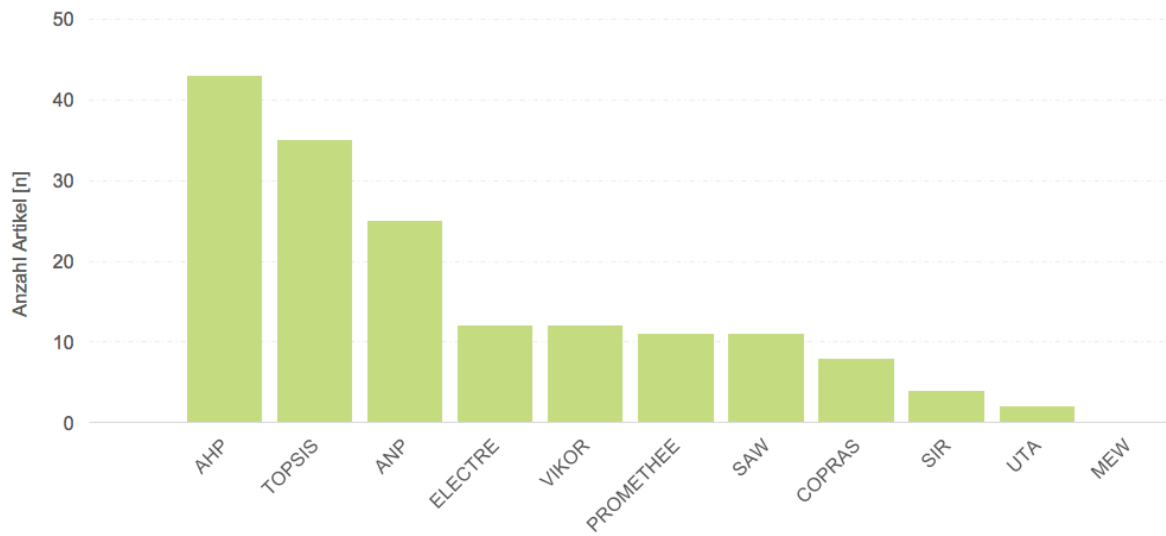


Abbildung 5.13: Übersicht berücksichtigter Artikel nach Anwendung der systematischen Literaturrecherche nach den Ausschlussphasen

6 Anwendung multikriterieller Entscheidungsmethoden

Die im Kapitel 5 vorgestellten Methoden werden in diesem Kapitel detaillierter erläutert. Dabei werden die grundlegenden mathematischen Schritte angeführt und die jeweiligen Methoden an einem Anwendungsbeispiel getestet. Am Ende des Kapitels befindet sich eine Zusammenstellung an Publikationen, welche die Anwendung der jeweiligen multikriteriellen Entscheidungsmethoden transparent (inklusive Berechnungsschritte) darstellen.

6.1 Analytic Hierarchy Process

Der Analytic Hierarchy Process (AHP) ist ein wirksames Instrument für den Umgang mit komplexen Entscheidungsprozessen und kann dem Entscheidungsträger dabei helfen Prioritäten zu setzen und die beste Lösung für ein Entscheidungsproblem zu finden. Wenn wir über Entscheidungen mit mehreren Kriterien sprechen, können viele Methoden zur Lösung des Entscheidungsproblems verwendet werden. Eine der bekanntesten multikriteriellen Entscheidungsmethoden ist der AHP. Bei diesem Verfahren wird das Entscheidungsproblem in eine Hierarchie zerlegt. An der Spitze der Hierarchie steht das Entscheidungsziel. Die Kriterien befinden sich auf der nächsten Ebene, die in Unterkriterien zerlegt werden können. Auf der letzten Ebene sind die Alternativen angeordnet. Mit paarweisen Vergleichen werden lokale Prioritäten von Alternativen sowie Kriteriengewichte berechnet. Durch die Reduzierung komplexer Entscheidungen auf eine Reihe paarweiser Vergleiche und die anschließende Synthese der Ergebnisse trägt der AHP dazu bei, subjektive und objektive Aspekte einer Entscheidung zu erfassen. Darüber hinaus enthält der AHP eine nützliche Methode, um die Konsistenz der Entscheidungen des Entscheidungsträgers zu überprüfen und so die Verzerrung des Entscheidungsprozesses zu reduzieren. Mit dieser Vorgehensweise ist es möglich Prioritäten von Alternativen zu berechnen und Entscheidungsträger in ihren Entscheidungsprozessen zu unterstützen.

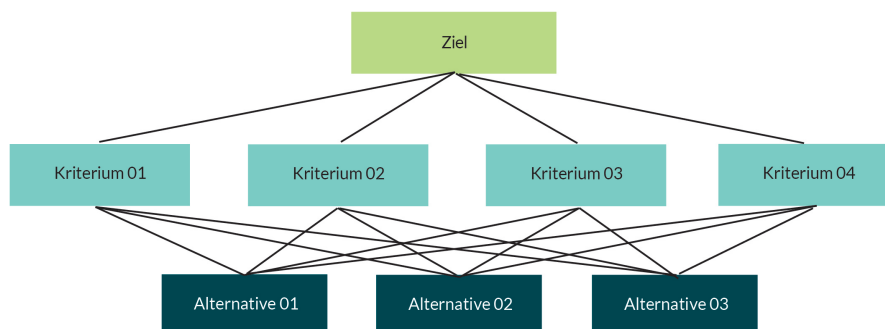


Abbildung 6.1: Vereinfachte Struktur des Analytischen Hierarchischen Prozesses

Der AHP wurde in den 1970er Jahren von Professor Thomas L. Saaty¹ [Saaty1977], [Saaty1980] entwickelt. Der AHP ist eine Methode aus der präskriptiven Entscheidungstheorie, vergleichbar mit der Nutzwertanalyse, um komplexe Entscheidungen zu beschreiben und zu analysieren. Die Ziele des AHPs sind Entscheidungsunterstützung, Minimierung des Zeitaufwandes bei der Entscheidungsfindung, Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Entscheidungsfindung und Informationslücken bzw. Unstimmigkeiten in der Entscheidungsfindung aufzudecken. Die Namenszusammensetzung des AHPs ergibt sich aus den drei grundlegenden Konzepten der Methode: Analytic, Hierarchy und Process.

Analytisch: Einfach ausgedrückt verwendet der AHP Zahlen. Für eine ganzheitliche Entscheidungsfindung sind prinzipiell keine Zahlen notwendig, da die Entscheidung auf die gewünschte Alternative fallen kann. Jedoch, gibt es gute Gründe wieso Mathematik zur Abbildung der Alternativen angewandt werden sollte, wenn es darum geht, die getroffenen Entscheidungen anderen Stakeholdern bzw. Personen zu erklären [Golden1989].

Hierarchie: Der AHP strukturiert das Entscheidungsproblem in unterschiedliche Ebenen, um das Verständnis für die jeweilige Problematik zu erleichtern. Demnach werden Entscheidungssituationen in Ziele, Kriterien, Unterkriterien und Alternativen unterteilt. Mit dem Unterteilen und dem Strukturieren in Ebenen wird das Entscheidungsproblem in kleinere Entscheidungssituationen zerlegt. Diese Unterteilung ist aus psychologischen Gründen sinnvoll, da Studien aus dem Themenbereich der Psychologie - das sogenannte Miller-Gesetz [Miller1956] - beweisen, dass ein Mensch lediglich 7 ± 2 Elemente in kurzer Zeit verarbeiten bzw. vergleichen kann [Golden1989].

Prozess: Menschen brauchen Zeit um über Entscheidungen nachzudenken, neue Informationen

¹1926, US-amerikanischer Mathematiker

6.1 Analytic Hierarchy Process

zu verarbeiten oder um Entscheidungen zu besprechen. Das heißt, jedes reale Entscheidungsproblem beinhaltet einen Lernprozess in welchem Prioritäten diskutiert und überdacht werden. Das Ziel des AHPs ist es nicht diesen Prozess zu ersetzen, sondern ihn lediglich zu verkürzen und in weiterer Folge Informationslücken oder Unstimmigkeiten aufzuzeigen [Golden1989].

6.1.1 Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle

Die Anwendung bzw. Durchführung des AHPs erfolgt in fünf Schritten.

1. Hierarchische Darstellung des Entscheidungsproblems aus Zielkriterien und Alternativen
2. Paarweise Bewertung von Kriterien und Alternativen
3. Zusammenführung der Bewertungen zu Prioritäten für Kriterien und Alternativen
4. Konsistenzüberprüfung der Bewertungen
5. Ergebnisinterpretation

Im ersten Schritt muss das Entscheidungsproblem in eine hierarchische Struktur übergeführt werden. Die hierarchische Darstellung ist die Voraussetzung für die Anwendung von paarweisen Vergleichen.

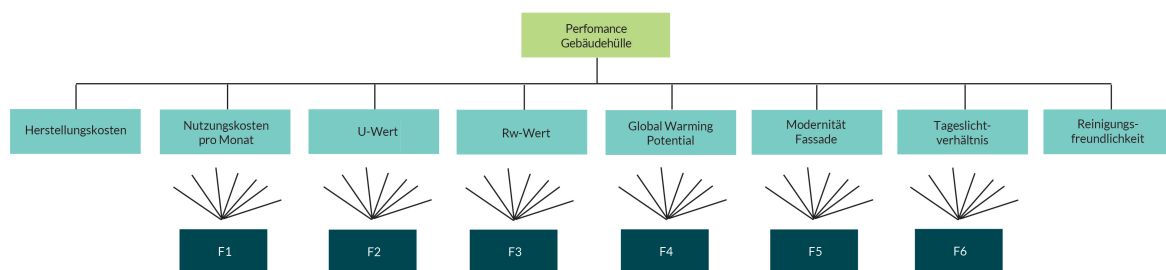


Abbildung 6.2: Hierarchische Struktur des Entscheidungsproblems

Ebene 1 stellt dabei das Ziel der Analyse dar. Im Zuge des Anwendungsbeispiels ist das Ziel, die Gebäudehülle mit der besten Performance auf Basis der 8 Kriterien und der Entscheidungsträgerpräferenz zu identifizieren. Auf Ebene 2 befinden sich die 8 Kriterien und die letzte Ebene spiegelt die Alternativen - also die unterschiedlichen Typen von Gebäudehüllen - wider. Zwischen Ebene 2 und Ebene 3 könnten bei Bedarf - für eine detailliertere Analyse - weitere Subkriterien-Ebenen eingeführt werden.

Der nächste Schritt ist die Durchführung der paarweisen Vergleiche für jedes Kriterium mit dem

Scoring-Ansatz von Saaty und Vargas [Saaty1977].

Tabelle 6.1: 9-Punkte-Skala für paarweise Vergleiche

Skala	Präferenzgrad
1	gleiche Bedeutung
3	etwas größere Bedeutung
5	erheblich größere Bedeutung
7	sehr viel größere Bedeutung
9	größtmöglicher Bedeutungsunterschied
2,4,6,8	Kompromiss zwischen Bedeutungsfaktoren

Die paarweisen Vergleiche basieren auf Basis einer metrischen Skala. Die Skala ist reziprok, so dass gilt:

$$p_{ij} = \frac{1}{p_{ji}} \tag{6.1}$$

Die Ergebnisse der Vergleiche (für jedes Faktorenpaar) werden mit ganzen Zahlen zwischen 1 (gleiche Bedeutung) bis 9 (größtmöglicher Bedeutungsunterschied) beschrieben.

Tabelle 6.2: Paarweise Vergleiche der Kriterien auf Basis der 9-Punkte-Skala

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
K1	1	4	2	3	7	8	3	9
K2	1/4	1	1/3	1/2	3	5	1/2	6
K3	1/2	3	1	2	5	6	2	8
K4	1/3	2	1	1	4	5	1	7
K5	1/7	1/3	1/5	1/4	1	2	1/4	3
K6	1/8	1/5	1/6	1/5	1/2	1	1/5	2
K7	1/3	2	1	1	4	5	1	7
K8	1/9	1/6	1/8	1/7	1/3	1	1/7	1
SUMME	2,8	12,7	4,8	8,1	24,8	32,5	8,1	43,0

Der nächste Schritt umfasst das Normieren der Kriterienmatrix, um unterschiedliche Einheiten der Kriterien vergleichbar zu machen. Dabei werden die durchgeführten paarweisen Vergleiche p_{ij} mit der Summe über alle p_{ij} dividiert.

$$c_{i_{gew}} = \frac{p_{ij}}{\sum_{i=0}^n p_{ij}} \tag{6.2}$$

Um die Beurteilung der Präferenzen des Entscheidungsträgers über alle Paarvergleiche auf Konsistenz zu überprüfen wird der Konsistenzwert (CR) berechnet. Der Konsistenzwert nimmt den Wert 0 an, wenn die Präferenzen des Entscheidungsträgers vollkommen konsistent sind

6.1 Analytic Hierarchy Process

Tabelle 6.3: Normieren der Kriterienmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	SUMME	MITTELWERT
K1	0,36	0,31	0,41	0,37	0,28	0,25	0,37	0,21	2,57	0,32
K2	0,09	0,08	0,07	0,06	0,12	0,15	0,06	0,14	0,78	0,10
K3	0,18	0,24	0,21	0,25	0,20	0,18	0,25	0,19	1,69	0,21
K4	0,12	0,16	0,10	0,12	0,16	0,15	0,12	0,16	1,11	0,14
K5	0,05	0,03	0,04	0,03	0,04	0,06	0,03	0,07	0,35	0,04
K6	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,05	0,24	0,03
K7	0,12	0,16	0,10	0,12	0,16	0,15	0,12	0,16	1,11	0,14
K8	0,04	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,17	0,02
SUMME	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		

und nimmt den Wert 1 an, wenn diese vollkommen inkonsistent sind. Ein Konsistenzwert unter 0,2 kann als akzeptabel angenommen werden. Übersteigt der Wert diese Schwelle sollten mit dem Entscheidungsträger die Reihung bzw. Gewichtung der Präferenzen überdacht werden bzw. eine vereinfachte hierarchische Struktur gewählt werden.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6.3)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6.4)$$

Zur Berechnung des Konsistenzwertes wird der Zufallsindex *R.I.* (Random Index) angewandt. Saaty ermittelte bis zur Matrizengröße $n=15$ mittels Zufallsgenerator bis zu 500 *C.I.*-Werte. Durch Berechnung des Mittelwerts über die erhaltenen *C.I.*-Werte bildete er für jede Matrixgröße einen Zufallsindex. In Tabelle 6.4 sind *R.I.*-Werte bis zur Matrizengröße $N=10$ abgebildet.

Tabelle 6.4: *RI*-Werte nach Saaty

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Durch die Anwendung der Formeln 6.3 und 6.4 sowie der *R.I.*-Werte aus Tabelle 6.4 wird das Konsistenzmaß für die getroffenen Angaben des Entscheidungsträgers ermittelt.

Nachdem die paarweisen Vergleiche, die Normierung der Kriterienmatrix und die Konsistenzprüfung durchgeführt wurden, kann die Reihung der Kriterien in Bezug auf die Präferenzen des Entscheidungsträgers (vorausgesetzt die Angaben des Entscheidungsträgers sind konsistent) festgelegt werden. Durch das Bilden der Mittelwerte, das heißt die Summenbildung der normierten Kriterienwerte und das Teilen durch die Gesamtanzahl an Kriterien (im vorliegenden Anwendungsbeispiel 8 Kriterien), können Prozentwerte für alle Kriterien berechnet werden.

Der Eigenvektor (Spalte Mittelwert) gibt das Ranking der Kriterien wieder. Dabei ist ersichtlich,

Tabelle 6.5: Konsistenzprüfung der Entscheidungsträgerpräferenzen

	SUMME	MITTELWERT	KONSISTENZMASS
K1	2,57	0,32	1,05
K2	0,78	0,10	1,02
K3	1,69	0,21	1,06
K4	1,11	0,14	1,05
K5	0,35	0,04	1,01
K6	0,24	0,03	1,01
K7	1,11	0,14	1,05
K8	0,17	0,02	1,01
CI	0,04		
RI	1,41		
CR	0,03		

dass K1 mit 0,32 das wichtigste Kriterium und K8 mit 0,02 das unwichtigste Kriterium für den Entscheidungsträger sind.

Angemerkt sei an dieser Stelle, dass die Kriteriengewichtung für die weiteren betrachteten MCDM-Methoden für eine bessere Vergleichbarkeit mit den erhaltenen Gewichtungen aus Tabelle 6.5 angenommen wurden.

Um zu einer abschließenden Reihung der Alternativen zu kommen werden auch diese in paarweisen Vergleichen, immer in Bezug auf ein Kriterium, gegenübergestellt. In nachfolgender Tabelle 6.6 werden die Berechnungen beispielhaft für das Kriterium *Herstellungskosten* dargestellt. Analog dazu werden die Berechnungen für alle weiteren Kriterien durchgeführt.

Tabelle 6.6: Paarweise Vergleiche, Konsistenzprüfung und Ermittlung der Alternativengewichtung

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	nte Wurzel	Prioritäten	λ_{max} pro Kriterium
F1	1	7	3	9	2	5	3,52	0,42	0,95
F2	1/7	1	1/3	2	1/5	1/2	0,46	0,05	1,01
F3	1/3	3	1	5	1/2	2	1,31	0,15	1,09
F4	1/9	1/2	1/5	1	1/6	1/3	0,29	0,03	0,90
F5	1/2	5	2	6	1	3	2,12	0,25	1,05
F6	1/5	2	1/2	3	1/3	1	0,76	0,09	1,07
SUMME	2,29	18,50	7,03	26,00	4,20	11,83	8,46	1,00	6,06
CI	0,01								
RI	1,24								
CR	0,01								

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	MITTELWERT
F1	0,44	0,38	0,43	0,35	0,48	0,42	0,41
F2	0,06	0,05	0,05	0,08	0,05	0,04	0,06
F3	0,15	0,16	0,14	0,19	0,12	0,17	0,16
F4	0,05	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04
F5	0,22	0,27	0,28	0,23	0,24	0,25	0,25
F6	0,09	0,11	0,07	0,12	0,08	0,08	0,09
SUMME	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Ein Gesamtüberblick der Alternativengewichtung über alle Kriterien und Alternativen ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

6.1 Analytic Hierarchy Process

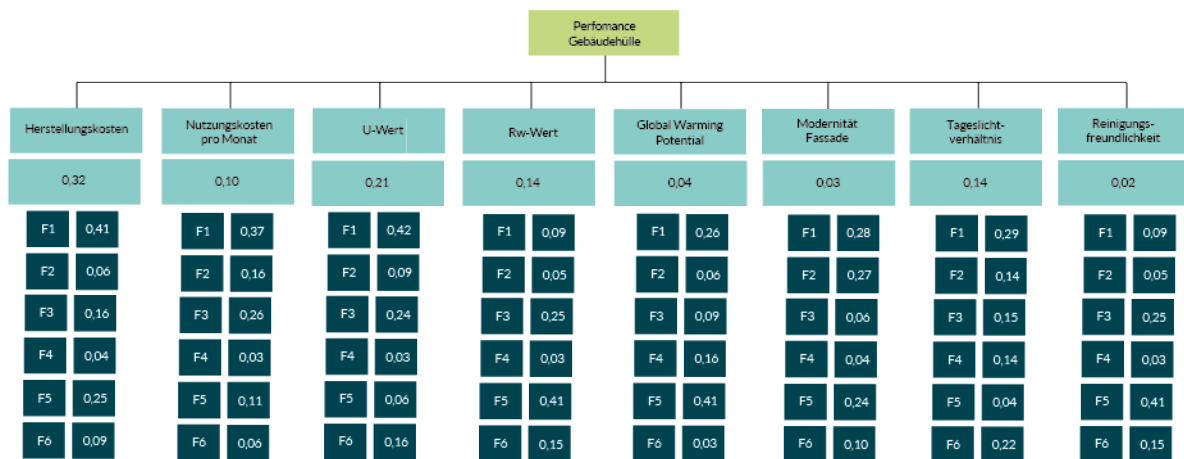


Abbildung 6.3: Prioritäten in der Hierarchie

Mit der erhaltenen Gewichtung der Kriterien und der Prioritätenmatrix kann die Reihung der Alternativen berechnet werden (Lösungsvektor L). Die Gebäudehülle, welche die Präferenzen des Entscheidungsträgers am besten erfüllt, ist die Alternative F1 (siehe 6.7).

$$L = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} c_{1_{gew}} \\ c_{2_{gew}} \\ c_{3_{gew}} \\ c_{4_{gew}} \\ c_{5_{gew}} \\ c_{6_{gew}} \\ c_{7_{gew}} \\ c_{8_{gew}} \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

Tabelle 6.7: Lösung des Entscheidungsproblems mittels AHP

F1	0,33	Rang 1	F1	0,33
F2	0,09	Rang 2	F5	0,20
F3	0,19	Rang 3	F3	0,19
F4	0,06	Rang 4	F6	0,13
F5	0,20	Rang 5	F2	0,09
F6	0,13	Rang 6	F4	0,06

Exkurs:

Für die ausgewählten multikriteriellen Entscheidungsmethoden wurde - wenn in angemessenem Umfang möglich - das Anwendungsbeispiel in einer Excel-Tabelle berechnet. Für die Methode Analytic Network Process (ANP) ist aufgrund von den modellierten Schleifen innerhalb von Kriterien die Software SuperDecision² herangezogen worden. Um die Unterschiede zur Methode AHP aufzuzeigen, wurde zusätzlich zur Excel-Berechnung auch der AHP mit der Software SuperDecision modelliert.

6.1.2 Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle mit der Software SuperDecision

Auch bei Anwendung der Software SuperDecision muss zunächst der hierarchische Aufbau des Entscheidungsproblems angelegt werden (siehe Abbildung 6.4).

²<https://www.superdecisions.com>

6.1 Analytic Hierarchy Process

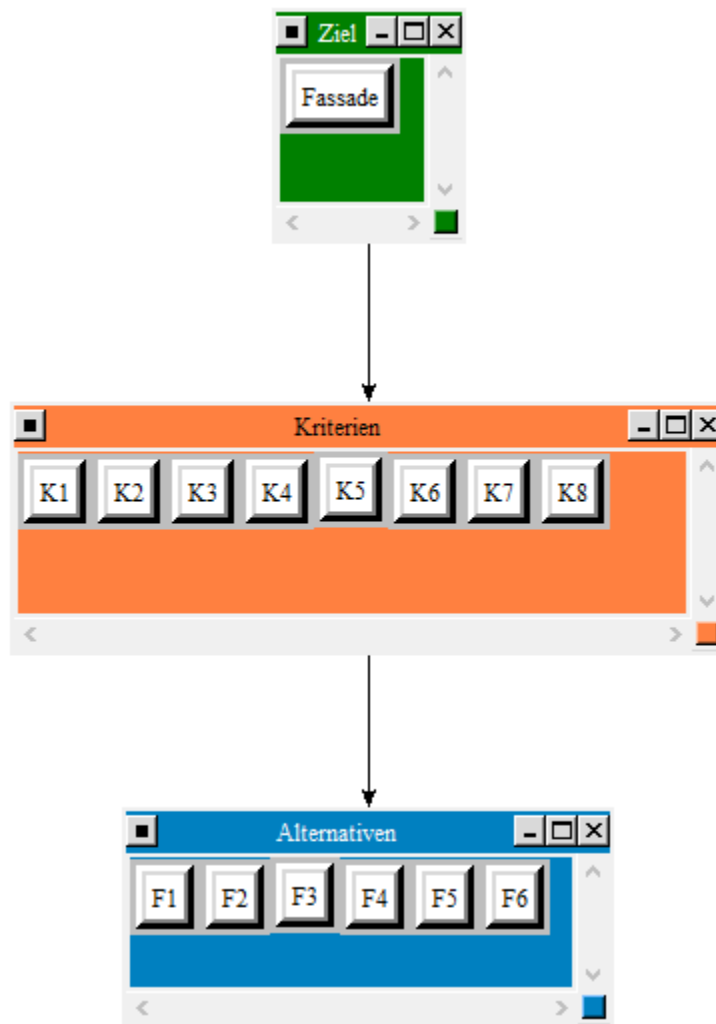


Abbildung 6.4: Hierarchieaufbau für AHP mit SuperDecision³

Im zweiten Schritt werden wieder die paarweisen Vergleiche durchgeführt. Die Handhabung mittels der Software SuperDecision ist dabei jedoch nutzerfreundlicher als eine Eingabe in Excel, da die Bewertungen angeklickt werden können und diese für die reziproke Betrachtung automatisch berechnet werden.

³Screenshot aus der Software SuperDecision

The screenshot shows the 'Comparisons for Super Decisions' software interface. It is divided into three main sections: '1. Choose', '2. Node comparisons with respect to Fassade', and '3. Results'.
 - **Section 1: Choose** includes options for 'Node Cluster' (Fassade), 'Cluster Ziel', and 'Choose Cluster' (Kriterien).
 - **Section 2: Node comparisons with respect to Fassade** displays a grid of pairwise comparisons between 28 criteria (K1 to K28). Each comparison is represented by a 9-point scale (1-9) and a consistency check result (e.g., '>=9.5 No comp.'). A note at the top states: 'K1 is moderately to strongly more important than K2'.
 - **Section 3: Results** shows a bar chart and a table of priority weights for each criterion. The inconsistency measure is 0.02533. The table below shows the results:

Criterion	Weight
K1	0.32386
K2	0.09458
K3	0.21355
K4	0.13797
K5	0.04259
K6	0.02924
K7	0.13797
K8	0.02024

Abbildung 6.5: Paarweise Vergleiche und Überprüfung des Konsistenzmaßes für Kriterien in SuperDecision⁴

Nachdem die Eingabe erfolgt ist, werden Inkonsistenzen und die Reihung der Alternativen automatisch berechnet. In Abbildung 6.6 ist die finale Reihung dargestellt, welche mit der Excel-Berechnung in Tabelle 6.7 übereinstimmt.

Die Gebäudehülle, welche die Präferenzen des Entscheidungsträger am besten erfüllt, ist die Alternative F1.

⁴Screenshot aus der Software SuperDecision

Report for toplevel

This is a report for how alternatives fed up through the system to give us our synthesized values. [Return to main menu.](#)

Alternative Rankings







Graphic	Alternatives	Total	Normal	Ideal	Ranking
	F1	0.1685	0.3370	1.0000	1
	F2	0.0446	0.0892	0.2648	5
	F3	0.0959	0.1917	0.5690	3
	F4	0.0293	0.0587	0.1742	6
	F5	0.1002	0.2004	0.5946	2
	F6	0.0615	0.1231	0.3652	4

Abbildung 6.6: Lösung des Entscheidungsproblems mittels AHP in SuperDecision⁵

AHP hat das Interesse vieler Forscher geweckt, hauptsächlich aufgrund der mathematischen Merkmale der Methode und der Tatsache, dass die Dateneingabe relativ einfach ist [Triantaphyllou:1995aa]. Die Einfachheit ist durch die paarweisen Vergleiche der Alternativen nach bestimmten Kriterien gekennzeichnet [Vargas:1990aa].

6.1.3 Fazit zur Anwendung von AHP

Der AHP wird den wert-basierten Techniken (utility-based techniques) zugeordnet. Durch die Anwendung des AHPs können Reihungsprobleme gelöst werden. Basierend auf der durchgeführten systematischen Literaturrecherche ist der AHP die meist verbreitetste multikriterielle Entscheidungsmethode (innerhalb der ausgewählten Methoden) in der Baubranche. Das Ergebnis des AHPs ist eine Reihung der Alternativen. Durch die Berechnung der Alternativenbewertungen ist es möglich die Abstände zwischen zwei Alternativen abzuschätzen bzw. interpretieren zu können. Benötigte Elemente zur Anwendung des AHPs sind Ziele (ein übergeordnetes Ziel bzw. mehrere Unterziele in den weiteren Ebenen der Hierarchie), Kriterien, Kriteriengewichtungen sowie Alternativen und Alternativengewichtungen für jedes Kriterium. Der Aufwand für den Entscheidungsträger ist bei der Anwendung des AHPs relativ groß, da die Methode den Vorteil bietet die Präferenzen des Entscheidungsträgers auf dessen Konsistenz zu überprüfen. In einem ersten Schritt muss der Entscheidungsträger bewerten, wie wichtig ihm ein Kriterium im Vergleich zu den anderen ist. Diese Schritte müssen für alle Kriterien durchgeführt werden und werden abschließend auf Konsistenz geprüft. Ist das Konsistenzmaß nicht zufriedenstel-

⁵Screenshot aus der Software SuperDecision

lend, müssen mit dem Entscheidungsträger die einzelnen Gegenüberstellungen wiederholt besprochen werden. Nach erfolgter Kriteriengegenüberstellung kann eine Reihung der Kriterien erfolgen und somit die Kriteriengewichtung ermittelt werden. Der zweite aufwendige Schritt für den Entscheidungsträger ist die Gegenüberstellung der Alternativen in Bezug auf die jeweiligen Kriterien. Nach Abschluss dieser Gegenüberstellungen erfolgt abermals eine Konsistenzprüfung. Wie zuvor erwähnt handelt es sich bei diesen Gegenüberstellungen um paarweise Vergleiche. Nach dem Einholen der erforderlichen Inputs hält sich der Berechnungsaufwand (mathematischer Umfang bis zur Lösung des Entscheidungsproblems) für den Analytisten in Grenzen. Die Anwendung des AHPs für mehrere Entscheidungsträger kann theoretisch wie bei allen anderen nicht-gruppenorientierten Entscheidungsmethoden auf drei Arten erfolgen. Das gemeinsame Erarbeiten der paarweisen Vergleiche, was aus Sicht der praktischen Anwendung eher aufwendig erscheint, das Errechnen eines Mittelwertes nachdem alle Entscheidungsträger die individuellen Kriteriengewichte inklusive Konsistenzprüfung abgearbeitet haben und durch das Berechnen eines Mittelwertes der finalen Reihungen der Alternativen. Bei der Berechnung einer gemeinsamen Kriteriengewichtung durch Mittelwertberechnung können auch Gewichte für einzelne Entscheidungsträger miteinbezogen werden, sofern deren Entscheidungskraft nicht gleichmäßig verteilt sein sollte. Zwei zu nennende Nachteile sind die Erweiterbarkeit des Entscheidungsmodells sowie das unberücksichtigt lassen von Wechselwirkungen. Werden weitere neue Alternativen hinzugefügt, müssen für diese die paarweisen Vergleiche mit den vorhandenen Alternativen durchgeführt werden. Ist das Konsistenzmaß danach unbefriedigend, müssen alle Alternativengegenüberstellungen neu durchdacht werden. Weiters verändert das Hinzufügen einer neuen Alternative das Reihungsergebnis. Der zweite angesprochene Nachteil ist das Vernachlässigen von Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Kriterien. Im Detail ist damit gemeint, dass ein Kriterium ein weiteres oder mehrere weitere positiv bzw. negativ beeinflussen kann und es somit durch Schleifen zu anderen Kriteriengewichtungen kommen kann.

Zur Durchführung des AHPs sind derzeit freie aber auch kommerzielle Softwareprodukte am Markt verfügbar. Ein abschließender, taxativer Überblick über Softwareprodukte wird im Kapitel 7.2 dargestellt.

6.2 Analytic Network Process

Der Analytic Network Process (ANP) ist eine allgemeinere Form des Analytic Hierarchy Process (AHP), der bei der Entscheidungsfindung mit mehreren Kriterien verwendet wird. ANP kommt vor allem dann zum Einsatz, wenn die Unabhängigkeiten der vorhandenen Kriterien oder Alternativen nicht gegeben sind bzw. Interaktionen aufweisen. Im Gegensatz zum AHP werden im ANP die Entscheidungsprobleme nicht als Hierarchien, sondern als Netzwerke modelliert. Der auch von *Saaty* entwickelte ANP ist eine Verallgemeinerung des AHPs. Abbildung 6.7 zeigt die strukturellen Unterschiede zwischen einer linearen Hierarchie und einem nichtlinearen Netzwerk. Die grundlegenden Elemente in der Hierarchie und im Netzwerk sind Cluster, Knoten und Abhängigkeiten.

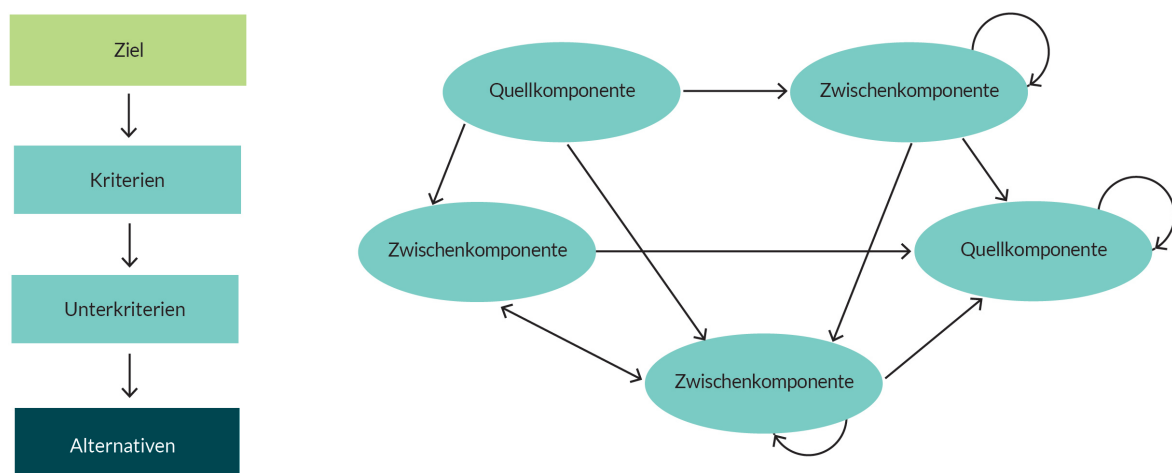


Abbildung 6.7: Unterschiede einer linearen Hierarchie und einem nichtlinearen Netzwerk

Die linke Seite von Abbildung 6.7 zeigt ein lineares Netzwerk (Hierarchie), in dem Elemente von der unteren Ebene des Netzwerks einen Einfluss auf eine höhere Ebene haben. Dabei beeinflussen zum Beispiel Kriterien das Ziel bzw. anders ausgedrückt das Ziel hängt von den Kriterien ab. Auf der rechten Seite von Abbildung 6.7 ist ein Netzwerk von Clustern und einige mögliche Abhängigkeiten zwischen ihnen dargestellt. In diesem Fall ist es möglich, dass ein Cluster von einem anderen Cluster abhängt, und somit diesen oder sogar sich selbst - beim Auftreten von Schleifen - beeinflussen kann. Im AHP wird jedes Element in der Hierarchie als unabhängig von allen anderen betrachtet. Somit werden die Entscheidungskriterien als unabhängig voneinander betrachtet und die Alternativen werden als unabhängig von den Entscheidungskriterien betrachtet. In vielen realen Fällen besteht jedoch eine gegenseitige Abhängigkeit zwischen den Kriterien und den Alternativen. Der ANP erfordert keine Unabhängigkeit zwischen Elementen,

so dass es in vielen praxisbezogenen Fällen als effektiveres Werkzeug als der AHP verwendet werden kann.

Nachdem das Entscheidungsproblem strukturiert wurde, müssen paarweise Vergleiche auf Elementebene durchgeführt werden. Dazu wird eine ungewichtete Supermatrix erstellt. Es ist eine quadratische Matrix aller Elemente und enthält lokale Prioritäten. Bei paarweisen Vergleichen kommt wie beim AHP Saaty's 9-Punkte-Skala zum Einsatz. Um die ungewichtete Supermatrix mit Prioritäten zu füllen, müssen Elemente mit anderen Elementen verglichen werden. Die Vergleiche, die gemacht werden müssen, sind:

- Vergleiche von Kriterien in Bezug auf das Ziel
- Vergleiche von Kriterien in Bezug auf andere Kriterien
- Vergleiche von Kriterien, die dasselbe Kriterium aus demselben Cluster in Bezug auf dieses Kriterium beeinflussen
- Vergleiche von Alternativen in Bezug auf jedes Kriterium
- Vergleiche von Kriterien in jedem Cluster in Bezug auf jede Alternative

Der nächste Schritt bildet die paarweisen Vergleiche auf Clusterebene (wenn vorhanden). Das Ziel dieses Schrittes ist es, die ungewichtete Matrix in die gewichtete Supermatrix umzuwandeln. Zur Berechnung der endgültigen Prioritäten muss die Limitmatrix erstellt werden. In diesem Schritt wird die gewichtete Matrix mit sich selbst multipliziert.

6.2.1 Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle

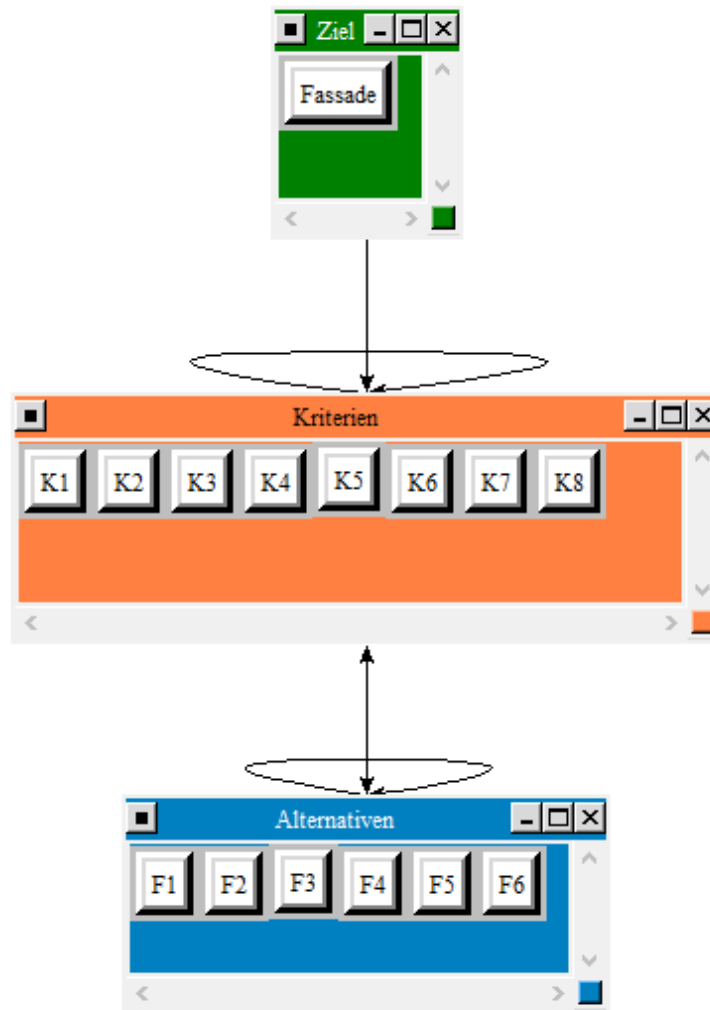
Zur Anwendung des ANPs sind folgende Schritte notwendig [Sedlmeier2014]:

1. Problemstrukturierung

Innerhalb der Problemstrukturierungen werden das Ziel, die Alternativen, die Cluster und die Kriterien definiert. Werden Entscheidungen delegiert kann in dieser Phase auch die Selektion der an der Lösung beteiligten Personen (Entscheidungsträger) stattfinden.

2. Netzwerkaufbau

Das Anwendungsbeispiel für die Methode ANP wurde nur mit der Software SuperDecision modelliert. Im Gegensatz zum AHP sind in Abbildung 6.8 die Abhängigkeiten der einzelnen Elemente durch die Schleifen ersichtlich.

Abbildung 6.8: Modellaufbau für ANP in SuperDecision⁶

Aufbauend auf der Problemstrukturierung wird das Problem ganzheitlich erfasst und als Netzwerk aufgebaut. Notwendige Abhängigkeiten für den Aufbau des Netzwerkes zwischen Clustern oder Kriterien werden bereits in der Problemstrukturierung definiert [Ayag:2007aa]. Zur einfacheren Ermittlung und Darstellung - und in weiterer Folge zur einfacheren und verbesserten Kommunikation zwischen Entscheidungsträgern und Analysten - kann eine Abhängigkeitsmatrix erstellt werden. In Abbildung 6.9 ist der Aufbau einer Abhängigkeitsmatrix beispielhaft dargestellt.

⁶Screenshot aus der Software SuperDecision

Strategisches Kontrollkriterium		Subcluster 1			Subcluster 2		Subcluster 3		Alternativen
		Bewertungs-kriterium 1	Bewertungs-kriterium 2	Bewertungs-kriterium 3	Bewertungs-kriterium 4	Bewertungs-kriterium 5	Bewertungs-kriterium 6	Bewertungs-kriterium 7	
Subcluster 1	Bewertungs-kriterium 1	0	1	1	0	0	1	0	0
	Bewertungs-kriterium 2	0	0	1	0	0	0	1	0
	Bewertungs-kriterium 3	1	0	0	0	0	1	0	0
Subcluster 2	Bewertungs-kriterium 4	0	1	0	0	1	0	0	0
	Bewertungs-kriterium 5	0	0	0	1	0	0	0	0
Subcluster 3	Bewertungs-kriterium 6	0	0	0	0	0	0	1	0
	Bewertungs-kriterium 7	0	1	0	0	0	1	0	0
Alternativen		1	1	1	1	1	1	1	0

Abbildung 6.9: Exemplarische Darstellung einer Abhängigkeitsmatrix⁷

Abhängigkeiten zwischen einzelnen Elementen können mit der Ziffer 1, Unabhängigkeiten mit der Ziffer 0 eingetragen werden. Besteht die Möglichkeit eine detaillierte Gewichtung der Abhängigkeiten zu definieren, können zum Beispiel auch Werte zwischen 0 und 1 eingetragen werden. Durch die Summenbildung kann in weiterer Folge die Stärke der Wechselwirkungen auf Clusterebene ermittelt werden.

3. Bewertungsphase

Durch die Zuhilfenahme von erstellten Fragebögen können die notwendigen Vergleiche vereinfacht durchgeführt werden.

Folgende Vergleiche müssen durchgeführt werden:

- a) Der Vergleich zweier Alternativen in Bezug auf jedes Kriterium. Diese Vergleiche können auf Basis der 9-Punkte Skala von Saaty durchgeführt werden.
- b) Der zweite Vergleich umfasst die paarweise Gegenüberstellung von Kriterien eines Subclusters. Dabei müssen nur die Kriterien mit den identifizierten Interaktionen in der Abhängigkeitsmatrix berücksichtigt werden.
- c) Der dritte Vergleich stellt die Gewichtung der Subcluster dar. Dabei werden die Einflüsse von zwei Subclustern auf einen Dritten ermittelt.

⁷Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Strategieimplementierung [Sedlmeier2014]

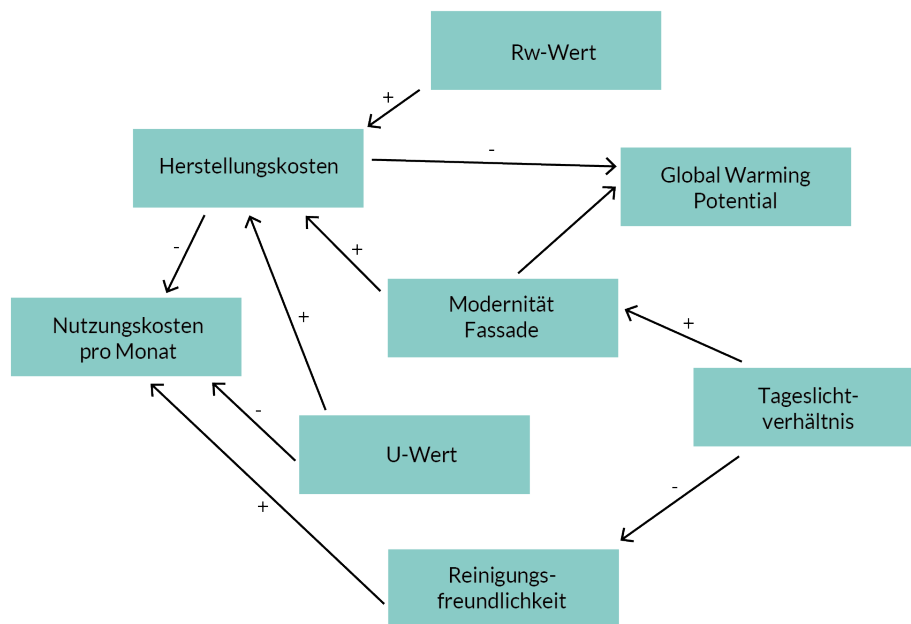


Abbildung 6.10: Wechselwirkungen zwischen den Kriterien

Der Einfluss der Kriterien untereinander wurde vom Entscheidungsträger festgelegt.

4. Matrizenberechnungen

Wie beim AHP wird die Konsistenz der eingeholten Angaben des Entscheidungsträgers geprüft. Die mathematische Vorgangsweise ist die selbe wie beim AHP (vgl. 6.3 und 6.4).

Die bereits genannten mathematischen Zwischenschritte für die Ermittlung der Komponenteneinflussmatrix, der ungewichteten Supermatrix, der gewichteten Supermatrix und der Limitmatrix können mit der Software SuperDecision nicht separat ausgegeben werden.

Die Komponentenmatrix muss beim ANP, jedoch nicht, aufgrund der nicht berücksichtigten Abhängigkeiten zwischen Kriterien und Cluster, beim AHP berechnet werden. Die Inhalte der Komponentenmatrix sind Prioritätenvektoren. Mit der Erstellung der ungewichteten Supermatrix wird der Gesamteinfluss (globale Priorität) eines jeden Elements auf das Entscheidungsproblem bestimmt [Sedlmeier2014].

Die gewichtete Supermatrix ist notwendig um die Gewichtung der Subcluster miteinzubeziehen. Diese Notwendigkeit besteht, da es in jedem Subcluster ein Element gibt, welches die höchste Priorität hat, jedoch dieses Element nicht die höchste Priorität aus ganzheitlicher Sicht im Netzwerk haben muss [Sedlmeier2014]. Wird die Struktur einer Hierarchie (AHP) verwendet, weisen die ungewichtete und die gewichtete Supermatrix die gleichen Werte auf. Abschließend muss die gewichtete Supermatrix normiert werden.

Durch die Erstellung der Limit-Matrix können neben den direkten Einflüssen auch indirekte Einflüsse miteinbezogen werden.

5. Ergebnisanalyse

Die finale Reihung der Ergebnisse kann mit mehreren mathematischen Funktionen erzielt werden. In der Software SuperDecision wird der additiv, probabilistische Ansatz angewandt.

$$Value_{Alternative} = bB + oO + c(1 - C) + r(1 - R) \tag{6.6}$$

In Abbildung 6.11 wird der Ergebnisbericht aus dem Softwaretool SuperDecision dargestellt. Die finale Reihung der Alternativen ergibt die gleiche Rangfolge wie beim AHP, jedoch mit anderen Abständen zwischen den einzelnen Alternativen. Dieses Ergebnis erklärt sich damit, dass keine zusätzlichen Cluster im Anwendungsbeispiel eingeführt wurden. Aufgrund der definierten Wechselwirkungen und der Gewichtung der Kriterien ergibt sich bei der Anwendung von ANP keine Unterscheidung im Ergebnis im Vergleich zum AHP.

Report for toplevel

This is a report for how alternatives fed up through the system to give us our synthesized values. [Return to main menu.](#)

Alternative Rankings

Graphic	Alternatives	Total	Normal	Ideal	Ranking
	F1	0.0581	0.1182	0.4930	6
	F2	0.0680	0.1383	0.5769	4
	F3	0.0598	0.1217	0.5076	5
	F4	0.1178	0.2397	1.0000	1
	F5	0.0839	0.1708	0.7126	3
	F6	0.1039	0.2115	0.8823	2

Abbildung 6.11: Lösung des Entscheidungsproblems mit ANP in der Software SuperDecision⁸

6.2.2 Fazit zur Anwendung von ANP

Wie der AHP wird der ANP den wert-basierten Techniken (utility-based techniques) zugeordnet. Durch die Anwendung des ANPs können Reihungsprobleme unter Berücksichtigung von Interaktionen zwischen Kriterien und Clustern gelöst werden. Durch die aufwendigere Anwendung und der komplizierten mathematischen Berechnungen reiht sich der ANP - auf Basis der durchgeführten systematischen Literaturrecherche - am Ende des ersten Drittels der berücksichtigten Methoden ein.

⁸Screenshot aus der Software SuperDecision

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Möglichkeiten unter der Methode AHP können mit dem ANP zusätzlich direkte und indirekte Wechselwirkungen in die Reihung der Alternativen miteinbezogen werden. Neben den vorhandenen Elementen bei der Anwendung des AHPs können beim ANP Cluster und Subcluster - sowie deren notwendige Gewichtungen - hinzukommen. Der Aufwand für den Entscheidungsträger ist bei der Anwendung des ANPs größer als beim AHP. Dies resultiert aus dem zusätzlichen Aufwand zur Bewertung der Wechselwirkungen. In Bezug auf die Konsistenzprüfung und auf das Einbinden von mehreren Entscheidungsträgern gibt es keine Vor- oder Nachteile im Vergleich zum AHP. Der Vorteil das die Realität von Entscheidungsproblemen in der Praxis besser - aufgrund der Wechselwirkungen - abgebildet werden können, zieht den Nachteil des Mehraufwandes in der Anwendung mit sich. Der große Mehraufwand und somit der Nachteil gegenüber AHP ist der zusätzliche Berechnungsschritt der Prioritätenmatrix. Damit wird die Umsetzung zum Beispiel in einem Tabellenblatt wie Excel maßgebend erschwert bzw. nicht mehr möglich. Dieser Nachteil zieht sich auch bis zur Erweiterung des Modells durch zusätzliche Alternativen, Kriterien oder Cluster.

Zur Durchführung des ANPs sind derzeit freie aber auch kommerzielle Softwareprodukte am Markt verfügbar. Ein abschließender, taxativer Überblick über Softwareprodukte wird im Kapitel 7.2 dargestellt.

6.3 Complex proportional assessment

Die multikriterielle Entscheidungsmethode COPRAS wurde von *Zavadskas* [**Zavadskas1994**], [**Zavadskas:2014aa**] entwickelt und ähnelt in den Ablaufschritten stark der Simple Additive Weighting (SAW) Methode. COPRAS wurde erst 1994 entwickelt und 1996 verbessert [**Zavadskas:2008aa**]. Diese Methode verwendet die schrittweise Rangfolge sowie die Bewertung von Alternativen nach ihrer Signifikanz und ihrem Nutzungsgrad [**Zavadskas:2008ab**]. COPRAS wurde wegen der Einfachheit in der Anwendung auf verschiedene Arten von Entscheidungsproblemen getestet [**Kundakc2016**].

Die Ablaufschritte der COPRAS-Methode sind:

1. Konstruktion der Entscheidungsmatrix X mit der Anzahl an Alternativen n und der Anzahl an Kriterien m sowie Normierung der Entscheidungsmatrix X_{norm}
2. Ermittlung der gewichteten, normierten Entscheidungsmatrix $X_{norm_{gew}}$
3. Aufsummieren der gewichteten, normierten Entscheidungsmatrix für Maximierungskriterien - Kriterien, welche maximiert werden sollen - (beneficial attributes) und für Minimierungskriterien - Kriterien, welche minimiert werden sollen - (non-beneficial attributes)
4. Ermittlung der relativen Gewichtung für jede Alternative
5. Berechnung des Nutzungsgrads für jede Alternative

6.3.1 Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle

Ein detailliertes Ablaufschema für das Reihen von Alternativen mit COPRAS wird in [**Zavadskas:2008ac**] und [**Zavadskas:2009aa**] beschrieben.

Bei der Einstufung von Alternativen nach COPRAS wird eine direkte und proportionale Abhängigkeit der Signifikanz und Priorität der untersuchten Alternativen von einem Kriteriensystem vorausgesetzt [**Ustinovichius2007**], [**Viteikiene:2007aa**].

1. Konstruieren und Normieren der Entscheidungsmatrix

In multikriteriellen Entscheidungsmethoden haben Kriterien oftmals unterschiedliche Maßeinheiten. Um die Kennwerte der betrachteten Alternativen in vergleichbare, dimensionslose

6.3 Complex proportional assessment

Werte umzuwandeln wird ein Normierungsverfahren verwendet.

$$X_{norm} = \frac{m_{jk}}{\sum_{j=1}^n m_{jk}} \tag{6.7}$$

Tabelle 6.8: Normierung der Entscheidungsmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	120	2058,5	0,16	0,33	0,75	1	1	3
F2	200	2350	0,24	0,4	1,57	2	2	3
F3	140	2099	0,17	0,23	1	4	3	2
F4	250	4190	0,35	0,43	0,93	4	2	2
F5	130	3015	0,3	0,2	0,6	1	4	1
F6	170	3700	0,21	0,28	1,7	3	1	4
SUMME	1010,0	17412,5	1,4	1,9	6,6	15,0	13,0	15,0

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	0,12	0,12	0,11	0,18	0,11	0,07	0,08	0,20
F2	0,20	0,13	0,17	0,21	0,24	0,13	0,15	0,20
F3	0,14	0,12	0,12	0,12	0,15	0,27	0,23	0,13
F4	0,25	0,24	0,24	0,23	0,14	0,27	0,15	0,13
F5	0,13	0,17	0,21	0,11	0,09	0,07	0,31	0,07
F6	0,17	0,21	0,15	0,15	0,26	0,20	0,08	0,27
SUMME	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Zur Gewichtung der normierten Entscheidungsmatrix werden subjektive Kriteriengewichte benötigt. Diese gewichteten Kriterien spiegeln die Präferenzen des Entscheidungsträgers wider.

Folgende Kriteriengewichtung wurde angenommen:

Tabelle 6.9: Subjektive Gewichtung der Kriterien

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
Gewichtung	32%	10%	21%	14%	4%	3%	14%	2%

2. Gewichtung der normierten Entscheidungsmatrix

In diesem Schritt wird die normierte Entscheidungsmatrix mit den jeweiligen Gewichtungen multipliziert.

$$X_{norm_{gew}} = w_c * X_{norm} \tag{6.8}$$

Tabelle 6.10: Gewichtete und normierte Entscheidungsmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	0,038	0,012	0,023	0,025	0,005	0,002	0,011	0,004
F2	0,063	0,013	0,035	0,030	0,010	0,004	0,022	0,004
F3	0,044	0,012	0,025	0,017	0,006	0,008	0,032	0,003
F4	0,079	0,024	0,051	0,032	0,006	0,008	0,022	0,003
F5	0,041	0,017	0,044	0,015	0,004	0,002	0,043	0,001
F6	0,054	0,021	0,031	0,021	0,010	0,006	0,011	0,005
SUMME	0,320	0,100	0,210	0,140	0,040	0,030	0,140	0,020

3. Summenbildung der Maximierungs- und Minimierungskriterien

In dem COPRAS-Verfahren wird jede Alternative mit ihren Summen der Maximierungskriterien (beneficial attributes) ($S + i$) und der Minimierungskriterien (non-beneficial attributes) ($S - i$) beschrieben.

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^n y_{+ij} \tag{6.9}$$

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^n y_{-ij} \tag{6.10}$$

Tabelle 6.11: Summenbildung der Maximierungs- und Minimierungskriterien

	S+i	Wert	S-i	Wert	Smin/Si
F1	S+1	0,00	S-1	0,12	1,00
F2	S+2	0,00	S-2	0,18	0,66
F3	S+3	0,00	S-3	0,15	0,81
F4	S+4	0,00	S-4	0,22	0,53
F5	S+5	0,00	S-5	0,17	0,71
F6	S+6	0,00	S-6	0,16	0,75
MIN				0,12	
SUMME				1,00	4,46

Im vorliegenden Anwendungsbeispiel ist das Optimierungsziel für alle 8 Kriterien das Minimieren der Kriterien. Daher ergeben sich für die Werte der Maximierungskriterien stets die Werte Null.

4. Berechnung der relativen Gewichte für jede Alternative

$$Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-min} \sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^m S_{-min}/S_{-i}} \tag{6.11}$$

Um die relativen Gewichte der Alternativen berechnen zu können, müssen zunächst die Signifikanzen der Alternativen auf der Grundlage der Definition der Maximierungs- und Minimierungskriterien bestimmt werden.

5. Berechnung des Nutzungsgrades für jede Alternative

Um eine abschließende Reihung zu erhalten muss der quantitative Nutzen (U_i) für die Alternativen berechnet werden.

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} * 100 \tag{6.12}$$

Die Prioritätsreihenfolge der verglichenen Alternativen wird auf der Grundlage ihres relativen Gewichts bestimmt. Die Alternative mit höherem relativen Gewicht hat eine höhere

Priorität (Rang) und die Alternative mit dem höchsten relativen Gewicht ist die akzeptabelste Alternative.

Tabelle 6.12: Lösung des Entscheidungsproblems mittels COPRAS

	Qi	Ui			
F1	0,22	100,00	Rang 1	F1	100,00
F2	0,15	65,90	Rang 2	F3	80,85
F3	0,18	80,85	Rang 3	F6	74,90
F4	0,12	53,12	Rang 4	F5	71,23
F5	0,16	71,23	Rang 5	F2	65,90
F6	0,17	74,90	Rang 6	F4	53,12

6.3.2 Fazit zur Anwendung von COPRAS

COPRAS wird zu der Sparte „Compromise Methods“ zugeordnet. Notwendige Elemente zur Durchführung der Methode sind Alternativen, Kriterien und die Kriteriengewichtungen. Die mathematische Umsetzbarkeit von COPRAS ist im Vergleich zu den anderen betrachteten Methoden als neutral einzustufen. Wie beim AHP und ANP werden subjektive Präferenzen des Entscheidungsträgers für die Kriteriengewichtung benötigt. Diese Gewichtung kann zum Beispiel mit der 9-Punkte Skala von *Saaty* durchgeführt werden. Wird die Gewichtungsmethode von *Saaty* angewandt, sollte auch eine Konsistenzprüfung durchgeführt werden. Bei einer definierten Gewichtung können vom Entscheidungsträger vereinfacht auch Prozentwerte angegeben werden (siehe Tabelle 6.9). Zur finalen Reihung der Alternativen kommt man bei COPRAS über die Bestimmung der Maximierungs- und Minimierungskriterien. Vorteile der Methode sind die einfachen Erweiterungsmöglichkeiten von Alternativen oder Kriterien. Dabei muss lediglich die Kriteriengewichtung neu diskutiert werden. Bei Benutzung einer qualitativen Skala für die Kriteriengewichtung können zusätzliche Kriterien auch ohne Mehraufwand ergänzt werden. Wie beim AHP werden auch bei COPRAS die möglichen Wechselwirkungen zwischen Kriterien nicht berücksichtigt, was zu einem unvollständigen Abbild des Entscheidungsproblems führen kann.

Zur Durchführung von COPRAS sind derzeit freie aber auch kommerzielle Softwareprodukte am Markt verfügbar. Ein abschließender, taxativer Überblick über Softwareprodukte wird im Kapitel 7.2 dargestellt.

6.4 Elimination et choix traduisant la réalité

Die erste ELECTRE-Methode wurde von *Benayoun, Roy und Sussman* im Jahr 1966 vorgestellt. Der erste wissenschaftliche Artikel erschien erst 1968 als *Roy* die Methode ausführlich beschrieb. Später wurde diese erste entwickelte Methode in ELECTRE I umbenannt. Der Name ELECTRE Iv (v für veto) wird manchmal verwendet, wenn Veto-Schwellenwerte berücksichtigt werden, gilt aber nicht als offizieller Name. In den folgenden zwei Jahrzehnten wurden mehrere weitere ELECTRE-Methoden entwickelt: [A.-Sahaaya-Arul-Mary:2016aa]

- ELECTRE II (*Roy & Bertier,1971*)
- ELECTRE III (*Roy,1978*)
- ELECTRE IV (*Roy & Hugonnard,1982*)
- ELECTRE TRI (*Yu,1992; Roy & Bouyssou,1993*)
- ELECTRE IS (*Roy & Bouyssou,1993*).

In den letzten drei Jahrzehnten wurde eine umfangreiche Forschung auf dem Gebiet der ELECTRE-Methoden durchgeführt. Diese Forschung wurde vor allem von Wissenschaftler aus Europa vorangetrieben. Alle ELECTRE-Methoden sind sich in der Grundstruktur ähnlich, unterscheiden sich jedoch in der Art des zu lösenden Entscheidungsproblems [Giannoulis:2010aa], [Ulubeyli2009], [Marzouk:2011aa], [Govindan:2016aa].

1. Auswahlproblem

- ELECTRE I
- ELECTRE Iv
- ELECTRE IS

2. Reihungsproblem

- ELECTRE II
- ELECTRE III
- ELECTRE IB

3. Sortierungsproblem

- ELECTRE TRI

ELECTRE-Methoden können bei Entscheidungssituationen mit folgenden Merkmalen angewandt werden: [Figuera2016]

- Der Entscheidungsträger möchte mindestens drei Kriterien in das Modell aufnehmen. Die Aggregationsverfahren sind jedoch in Situationen, in denen Entscheidungsmodelle mehr als fünf Kriterien enthalten (bis zu zwölf oder dreizehn), besser geeignet.
- Alternativen werden (für mindestens ein Kriterium) auf einer Ordinalskala [Roberts1979] oder auf einer schwach intervallartigen Skala [Martel2002] bewertet. Diese Skalen sind nicht für den Vergleich von Differenzen geeignet.
- Der Ausgleich des Verlusts bei einem bestimmten Kriterium durch einen Gewinn bei einem anderen Kriterium ist für den Entscheidungsträger möglicherweise nicht akzeptabel. Daher erfordern solche Situationen den Einsatz von nichtkompensierenden Aggregationsverfahren.
- Für mindestens ein Kriterium gilt: Schwache Differenzen von Bewertungen sind nicht signifikant in Bezug auf Präferenzen, während die Kumulation mehrerer kleiner Differenzen signifikant werden kann. Dies erfordert die Einführung von Diskriminierungsschwellen (Gleichgültigkeit und Präferenz), was zu einer Präferenzstruktur mit einer umfassenden intransitiven binären Beziehung führt.

6.4.1 Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle

Die Anwendung der Methode ELECTRE umfasst folgende Schritte:

1. Normierung der Entscheidungsmatrix
2. Gewichtung der normierten Entscheidungsmatrix
3. Berechnung der Übereinstimmigkeitsmatrix (concordance matrix)
4. Berechnung der Uneinigkeitsmatrix (discordance matrix)
5. Berechnung der Glaubwürdigkeitsmatrix (credibility matrix)
6. Reihung der Alternativen

1. Normierung der Entscheidungsmatrix

Wie in Tabelle 6.13 dargestellt, erfolgt die Normierung der Entscheidungsmatrix über das Teilen der einzelnen Parameter durch die Wurzel der Summen von a_{kj}^2 . Mit der Normierung der Entscheidungsmatrix wird erreicht, dass alle Parameter einheitenlos und somit vergleichbar sind.

Tabelle 6.13: Berechnung der Normierungsparameter

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	120	2058,5	0,16	0,33	0,75	1	1	3
F2	200	2350	0,24	0,4	1,57	2	2	3
F3	140	2099	0,17	0,23	1	4	3	2
F4	250	4190	0,35	0,43	0,93	4	2	2
F5	130	3015	0,3	0,2	0,6	1	4	1
F6	170	3700	0,21	0,28	1,7	3	1	4
$\sum a_{ij}^2$	182300,00	5,45E+07	0,37	0,63	8,14	47,00	35,00	43,00
$\sqrt{\sum a_{ij}^2}$	426,97	7382,55	0,61	0,79	2,85	6,86	5,92	6,56

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{k,j}^2}} \tag{6.13}$$

Tabelle 6.14: Normierung der Entscheidungsmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	0,28	0,28	0,26	0,42	0,26	0,15	0,17	0,46
F2	0,47	0,32	0,40	0,51	0,55	0,29	0,34	0,46
F3	0,33	0,28	0,28	0,29	0,35	0,58	0,51	0,30
F4	0,59	0,57	0,58	0,54	0,33	0,58	0,34	0,30
F5	0,30	0,41	0,49	0,25	0,21	0,15	0,68	0,15
F6	0,40	0,50	0,35	0,35	0,60	0,44	0,17	0,61

2. Gewichtung der Entscheidungsmatrix

Zur Gewichtung der normierten Entscheidungsmatrix werden subjekte Kriteriengewichte benötigt. Diese gewichteten Kriterien spiegeln die Präferenzen des Entscheidungsträgers wider.

Folgende Kriteriengewichtung wurde angenommen:

Tabelle 6.15: Subjektive Gewichtung der Kriterien

Gewichtung	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
	32%	10%	21%	14%	4%	3%	14%	2%

$$y_{ij} = x_{ij} * w_i \tag{6.14}$$

Tabelle 6.16: Gewichtung der Entscheidungsmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	0,090	0,028	0,055	0,058	0,011	0,004	0,024	0,009
F2	0,150	0,032	0,083	0,071	0,022	0,009	0,047	0,009
F3	0,105	0,028	0,059	0,041	0,014	0,018	0,071	0,006
F4	0,187	0,057	0,121	0,076	0,013	0,018	0,047	0,006
F5	0,097	0,041	0,104	0,035	0,008	0,004	0,095	0,003
F6	0,127	0,050	0,073	0,050	0,024	0,013	0,024	0,012

Die Summe über die Alternativen der normierten und gewichteten Entscheidungsmatrix muss stets 1 ergeben.

6.4 Elimination et choix traduisant la réalité

3. Berechnung der Übereinstimmigkeitsmatrix

Die ELECTRE-Methoden basieren auf der Auswertung von zwei Indizes, dem Konkordanzindex und dem Diskordanzindex, die für jedes Paar von Alternativen definiert sind. Der Konkordanzindex für ein Paar von Alternativen a und b misst die Stärke der Hypothese, dass Alternative a mindestens so gut ist wie Alternative b . Der Diskordanzindex misst die Beweiskraft gegen diese Hypothese [Belton2002].

$$C(a,b) = \frac{\sum_{i \in Q(a,b)} w_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \tag{6.15}$$

Dabei spiegelt $Q(a,b)$ die Menge der Kriterien wider für welche Alternative a gleich bzw. bevorzugt gegenüber Alternative b ist.

Tabelle 6.17: Ermittlung des Übereinstimmungsmatrix (Concordance matrix)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F1	x	1,00	0,84	0,98	0,80	0,86
F2	0,02	x	0,17	0,94	0,45	0,19
F3	0,16	0,83	x	0,82	0,45	0,83
F4	0,02	0,20	0,23	x	0,14	0,06
F5	0,23	0,55	0,55	0,86	x	0,65
F6	0,28	0,81	0,17	0,94	0,35	x

4. Berechnung der Uneinigkeitsmatrix

Der Uneinigkeitsindex berechnet sich wie folgt:

$$D(a,b) = \frac{\max[g_i(b) - g_i(a)]}{\delta} \tag{6.16}$$

Wobei $g_i(a)$ die Performance der Alternative a in Bezug auf das Kriterium C_i darstellt. Analog dazu ist $g_i(b)$ die Performance der Alternative b in Bezug auf das Kriterium C_i . δ ergibt sich aus der maximalen Differenz von jedem Kriterium.

$$\delta = \max[g_i(b) - g_i(a)] \tag{6.17}$$

Tabelle 6.18: Ermittlung des Uneinigkeitsmatrix (Discordance matrix)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F1	x	0,00	0,37	0,03	0,32	0,24
F2	1,00	x	1,00	0,24	1,00	1,00
F3	1,00	0,53	x	0,29	0,29	1,00
F4	1,00	1,00	1,00	x	1,00	1,00
F5	1,00	0,90	1,00	0,53	x	1,00
F6	1,00	0,77	0,48	0,18	0,42	x

5. Berechnung der Glaubwürdigkeitsmatrix (credibility matrix)

Die Glaubwürdigkeitsmatrix (Credibility matrix) zeigt die Zuverlässigkeit der Hypothese an. Wenn der Konkordanzindex für alle Kriterien höher oder gleich dem Diskordanzindex ist, dann

ist der Grad der Glaubwürdigkeit gleich dem Konkordanzindex. Wenn der Konkordanzindex strikt unter dem Diskordanzindex liegt, dann ist der Grad der Glaubwürdigkeit gleich dem Konkordanzindex, der in direktem Zusammenhang mit der Bedeutung dieser Diskordanzen gesenkt wurde.

Tabelle 6.19: Berechnung der Glaubwürdigkeitsmatrix (Credibility matrix)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	SUMME
F1	x	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	5,00
F2	0,00	x	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00
F3	0,00	1,00	x	1,00	0,00	0,00	2,00
F4	0,00	0,00	0,00	x	0,00	0,00	0,00
F5	0,00	0,00	0,00	1,00	x	0,00	1,00
F6	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	x	1,00

6. Reihung der Alternativen

Tabelle 6.20: Lösung des Entscheidungsproblems mittels ELECTRE

	Übereinstimmung	Uneinigkeit	Ergebnis			
F1	5	0	5	Rang 1	F1	5
F2	1	2	-1	Rang 2	F3	1,00
F3	2	1	1	Rang 3	F5	0,00
F4	0	5	-5	Rang 4	F6	0,00
F5	1	1	0	Rang 5	F2	-1
F6	1	1	0	Rang 6	F4	-5

6.4.2 Fazit zur Anwendung von ELECTRE

ELECTRE wird auf Basis der gewählten Einteilung (siehe Abbildung 4.1) den Outranking-Methoden zugeordnet. Durch die Anwendung können mehrere Arten von Entscheidungsproblemen gelöst werden. Mit der Anwendung von ELECTRE I am Anwendungsbeispiel wurde ein Auswahlproblem gelöst. Das bedeutet, dass die Abstände zwischen den einzelnen Alternativen detaillierter analysiert werden sollten, da diese in der vorliegenden Form keine Aussagekraft besitzen. Bei der Einordnung der Methode ELECTRE zu den anderen angewandten MCDM-Methoden im Zuge der Baubranche liegt ELECTRE am Ende des ersten Drittels (siehe Abbildung 5.13). Benötigte Elemente zur Anwendung von ELECTRE sind Ziele, Kriterien, Kriteriengewichtungen und Alternativen inklusive deren Bewertung für jedes Kriterium. Der Aufwand für den Entscheidungsträger beschränkt sich bei ELECTRE auf die Angabe der Kriteriengewichtung. In einem ersten Schritt muss der Entscheidungsträger bewerten, wie wichtig ihm ein Kriterium im Vergleich zu den anderen ist. Diese Schritte müssen für alle Kriterien durchgeführt werden und können abschließend auf Konsistenz geprüft werden. Ist das Konsistenzmaß nicht zufriedenstellend müssen mit dem Entscheidungsträger die einzelnen Gegenüberstellungen

wiederholt besprochen werden. Die Anwendung von ELECTRE für mehrere Entscheidungsträger kann theoretisch wie bei allen anderen nicht-gruppenorientierten Entscheidungsmethoden auf drei Arten erfolgen. Das gemeinsame Erarbeiten der Kriteriengewichtung, was aus Sicht der praktischen Anwendung eher aufwendig erscheint, das Errechnen eines Mittelwertes nachdem alle Entscheidungsträger die individuellen Kriteriengewichte abgearbeitet haben oder das Errechnen eines Mittelwertes der finalen Alternativenreihung. Ein Vorteil dieser Methode umfasst die einfache Erweiterbarkeit der Entscheidungsmatrix im Hinblick auf den Aufwand des Entscheidungsträgers. Alternativen können hinzugefügt werden ohne weiteren benötigten Input des Entscheidungsträgers. Bei dem Erweitern von Kriterien muss die Kriteriengewichtung überarbeitet werden. Nachteile sind das Unberücksichtiglassen von Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Kriterien. Im Detail ist damit gemeint, dass ein Kriterium ein weiteres oder mehrere weitere Kriterien positiv bzw. negativ beeinflussen kann und es somit durch Schleifen zu anderen Kriteriengewichtungen kommen kann.

Zur Durchführung von ELECTRE sind derzeit freie aber auch kommerzielle Softwareprodukte am Markt verfügbar. Ein abschließender, taxativer Überblick über Softwareprodukte wird im Kapitel 7.2 dargestellt.

6.5 Multiplicative exponential weighting

Multiplicative Exponential Weighting (MEW) oder auch als Weighted Product Model (WPM) bezeichnet, ist eine Methode zur Entscheidungsunterstützung von Entscheidungsproblemen mit mehreren Kriterien. Es ist dem gewichteten Summenmodell (Simple Additive Weighting - SAW) ähnlich. Der Hauptunterschied besteht darin, dass anstelle der Addition in der mathematischen Hauptoperation eine Multiplikation durchgeführt wird.

MEW wird oft als dimensionslose Analyse bezeichnet, da ihre mathematische Struktur alle Maßeinheiten eliminiert [Triantaphyllou2000]. Daher kann MEW bei ein- und mehrdimensionalen MCDM-Problemen verwendet werden. Das heißt bei Entscheidungsproblemen, bei denen die Alternativen beschrieben werden, die unterschiedliche Maßeinheiten verwenden. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass sie anstelle der tatsächlichen Werte relative Werte verwenden kann [Triantaphyllou:1989aa].

MEW verwendet ein Multiplikationsverfahren, um seine Bewertungsattribute zu beziehen bei dem jedes Attribut mit einem Exponenten aus der entsprechenden Attributgewichtung exponentiert wird. Dieser Prozess ist vergleichbar mit dem Prozess der Normierung. Wie bei allen MCDA/MCDM-Methoden wird ein endlicher Satz von Entscheidungsalternativen vorausgesetzt, die in Bezug auf eine Reihe von Entscheidungskriterien beschrieben werden. Einige der ersten Referenzen auf diese Methode sind auf *Bridgman* [Bridgman1922] und *Miller* und *Starr* [Miller1960] zurückzuführen.

6.5.1 Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle

Die Anwendung von MEW umfasst im wesentlichen zwei Schritte:

1. Exponentieren der Matrixeinträge mit der subjektiven Kriteriengewichtung
2. Multiplizieren der exponentierten Matrixeinträge je Alternative

$$A_i = \prod_{j=1}^n (x_{ij})^{w_j} \quad (6.18)$$

6.5 Multiplicative exponential weighting

Tabelle 6.21: Entscheidungsmatrix

	K1	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	120	0,16	0,33	0,75	1	1	3
F2	200	0,24	0,4	1,57	2	2	3
F3	140	0,17	0,23	1	4	3	2
F4	250	0,35	0,43	0,93	4	2	2
F5	130	0,3	0,2	0,6	1	4	1
F6	170	0,21	0,28	1,7	3	1	4

Zur Gewichtung der normierten Entscheidungsmatrix werden subjekte Kriteriengewichte benötigt. Diese gewichteten Kriterien spiegeln die Präferenzen des Entscheidungsträgers wider.

Folgende Kriteriengewichtung wurde angenommen:

Tabelle 6.22: Subjektive Gewichtung der Kriterien

Gewichtung	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
	32%	10%	21%	14%	4%	3%	14%	2%

Tabelle 6.23: Gewichtung und Normierung der Entscheidungsmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	4,63	2,14	0,68	0,86	0,99	1,00	1,00	1,02
F2	5,45	2,17	0,74	0,88	1,02	1,02	1,10	1,02
F3	4,86	2,15	0,69	0,81	1,00	1,04	1,17	1,01
F4	5,85	2,30	0,80	0,89	1,00	1,04	1,10	1,01
F5	4,75	2,23	0,78	0,80	0,98	1,00	1,21	1,00
F6	5,17	2,27	0,72	0,84	1,02	1,03	1,00	1,03

Tabelle 6.24: Lösung des Entscheidungsproblems mittels MEW

	Ergebnis			
F1	5,84	Rang 1	F1	5,84
F2	9,04	Rang 2	F3	7,23
F3	7,23	Rang 3	F6	7,70
F4	11,15	Rang 4	F5	7,80
F5	7,80	Rang 5	F2	9,04
F6	7,70	Rang 6	F4	11,15

6.5.2 Fazit zur Anwendung von MEW

Wie der AHP und der ANP wird MEW den wert-basierten Techniken (utility-based techniques) zugeordnet. Durch die Anwendung von MEW können Reihungsprobleme gelöst werden. Trotz der sehr simplen Anwendung aus mathematischer Sicht liegt die Methode MEW im Vergleich zu den anderen angewandten MCDM-Methoden im Zuge der Baubranche (siehe Abbildung 5.13) an letzter Position.

Wie auch bei den bereits beschriebenen Methoden sind die notwendigen Elemente bei der

Anwendung von MEW Ziele, Kriterien, Kriteriengewichtungen und Alternativen inklusiver deren Leistungswerte in Bezug auf alle Kriterien. Die Anwendung von MEW für mehrere Entscheidungsträger kann theoretisch wie bei allen anderen nicht-gruppenorientierten Entscheidungsmethoden auf drei Arten erfolgen. Das gemeinsame Erarbeiten der Kriteriengewichtung, was aus Sicht der praktischen Anwendung eher aufwendig erscheint, das Errechnen eines Mittelwertes nachdem alle Entscheidungsträger die individuellen Kriteriengewichte abgearbeitet haben oder das Errechnen eines Mittelwertes der finalen Alternativenreihung.

Der Vorteil der einfachen Erweiterbarkeit von Alternativen und Kriterien treffen hier auf den Entscheidungsträger (lediglich die Angabe einer neuen Gewichtung der Kriterien) und auf den Analysten (durch die einfache mathematische Umsetzung) zu. Interaktionen zwischen einzelnen Kriterien können mit MEW nicht berücksichtigt werden.

Zur Durchführung von MEW sind derzeit freie aber auch kommerzielle Softwareprodukte am Markt verfügbar. Ein abschließender, taxativer Überblick über Softwareprodukte wird im Kapitel 7.2 dargestellt.

6.6 Preference ranking organization method for enrichment of evaluations

Die multikriterielle Entscheidungsmethode PROMETHEE wurden von *Brans* [**Brans:2005aa**] im Jahre 1982 entwickelt und ist der Sparte der Outranking-Verfahren zuzuordnen. Ähnlich wie bei ELECTRE wurden zu PROMETHEE mehrere Weiterentwicklungen erarbeitet, wobei zwischen PROMETHEE I bis VI unterschieden wird [**Geldermann2014**].

Mit PROMETHEE können multikriterielle Entscheidungsprobleme mit einer endlichen Anzahl an Alternativen analysiert werden. Wie beim AHP und beim ANP werden paarweise Vergleiche durchgeführt, welche die Grundlage der Präferenzen des Entscheidungsträgers darstellen. Im Gegensatz zu AHP und ANP wird jedoch nicht angenommen, dass sich der Entscheidungsträger seinen Präferenzen eindeutig bewusst ist. Zur Abbildung dieser Unsicherheiten bei der Präferenzfestlegung werden in PROMETHEE Präferenzfunktionen (siehe Abbildung 6.12) verwendet. Dadurch besteht die Möglichkeit schwache Präferenzen oder sogar Unvergleichbarkeiten auszudrücken [**Geldermann2014**]. Der Hauptunterschied zu anderen Methoden besteht jedoch darin, dass PROMETHEE die inneren Beziehungen jedes Bewertungsfaktors während des Entscheidungsprozesses berücksichtigt [**Murat2015**].

6.6.1 Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle

Die Anwendung und Durchführung von PROMETHEE erfolgt nach folgenden sechs Schritten:

1. Durchführung paarweiser Vergleiche zwischen Alternativen für jedes Kriterium
2. Festlegung und Definition der Präferenzfunktionen
3. Ermittlung der subjektiven Kriteriengewichtung
4. Bestimmung der Outranking-Relationen
5. Berechnung der Aus- und Eingangsflüsse
6. Aggregation und Auswertung

1. Durchführung paarweiser Vergleiche zwischen Alternativen für jedes Kriterium

Die Voraussetzung für die Anwendung der Methode ist wie bei den anderen beschriebenen MCDM-Methoden eine vollständige Entscheidungsmatrix. Dazu zählen die Identifikation der

Alternativen, das Festlegen des Ziels, das Definieren der Kriterien sowie die Bestimmung der Kriteriengewichtung.

Tabelle 6.25: Entscheidungsmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	-120	-2058,5	-0,16	-0,33	-0,75	-1	-1	-3
F2	-200	-2350,0	-0,24	-0,40	-1,57	-2	-2	-3
F3	-140	-2099,0	-0,17	-0,23	-1,00	-4	-3	-2
F4	-250	-4190,0	-0,35	-0,43	-0,93	-4	-2	-2
F5	-130	-3015,0	-0,30	-0,20	-0,60	-1	-4	-1
F6	-170	-3700,0	-0,21	-0,28	-1,70	-3	-1	-4

Bei der Berechnung der Abweichungen für die jeweiligen Kriterienwerte wird für Maximierungskriterien folgende Formel:

$$d_i(A_k, A_l) = x_{ik} - x_{il} \tag{6.19}$$

und bei Minimierungskriterien folgende Formel angewendet:

$$d_i(A_k, A_l) = -(x_{ik} - x_{il}) \tag{6.20}$$

Im ersten Schritt müssen für jedes Kriterium paarweise Vergleiche durchgeführt werden, um die Differenzen der Alternativen zu erhalten. Nachfolgend sind die paarweisen Vergleiche exemplarisch für Kriterium 1 (K1) und Kriterium 2 (K2) dargestellt.

Tabelle 6.26: Paarweise Vergleiche zwischen Alternativen pro Kriterium

K1	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F1	0	80	20	130	10	50
F2	-80	0	-60	50	-70	-30
F3	-20	60	0	110	-10	30
F4	-130	-50	-110	0	-120	-80
F5	-10	70	10	120	0	40
F6	-50	30	-30	80	-40	0

K2	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F1	0,0	291,5	40,5	2131,5	956,5	1641,5
F2	-291,5	0,0	-251,0	1840,0	665,0	1350,0
F3	-40,5	251,0	0,0	2091,0	916,0	1601,0
F4	-2131,5	-1840,0	-2091,0	0,0	-1175,0	-490,0
F5	-956,5	-665,0	-916,0	1175,0	0,0	685,0
F6	-1641,5	-1350,0	-1601,0	490,0	-685,0	0,0

2. Festlegung und Definition der Präferenzfunktionen

Im zweiten Schritt erfolgt die Festlegung der Präferenzfunktionen. Dazu stehen 6 Typen von Präferenzfunktionen zur Verfügung (siehe Abbildung 6.12).

6.6 Preference ranking organization method for enrichment of evaluations

Generalised criterion	Definition	Parameters to fix
<p><i>Type 1: Usual Criterion</i></p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	—
<p><i>Type 2: U-shape Criterion</i></p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	q
<p><i>Type 3: V-shape Criterion</i></p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p
<p><i>Type 4: Level Criterion</i></p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
<p><i>Type 5: V-shape with indifference Criterion</i></p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
<p><i>Type 6: Gaussian Criterion</i></p>	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$	s

Abbildung 6.12: Präferenzfunktionen⁹

Der Entscheidungsträger muss zunächst für jedes Kriterium eine Präferenzfunktion festlegen. Unter Zuhilfenahme dieser Funktionen können die Präferenzen detaillierter abgebildet werden. Nach der Durchführung der paarweisen Vergleiche (Differenzberechnung zwischen zwei Alternativen für jedes Kriterium) legt der Entscheidungsträger fest, inwieweit eine Differenz innerhalb der einzelnen Ausprägungen eines Kriteriums auch tatsächlich zu einer Präferenz führt. Wie

⁹PROMETHEE methods [Brans:2005aa]

in Abbildung 6.13 dargestellt spannt sich der Präferenzgrad von 0 (Indifferenz) bis 1 (strikte Präferenz). Mit den unterschiedlichen Präferenzfunktionen ist es möglich Zwischenbereiche abzubilden (schwache Präferenz und starke Präferenz).

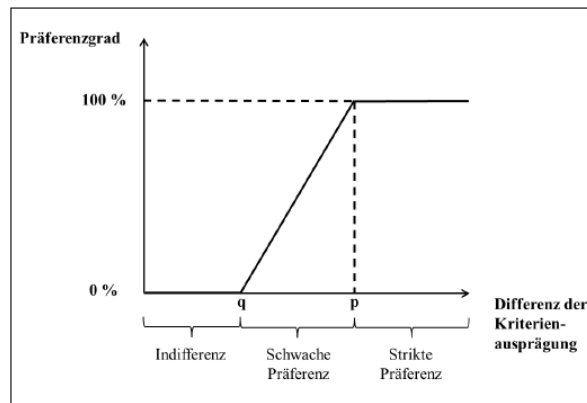


Abbildung 6.13: Aufbau einer Präferenzfunktion (Typ 5)¹⁰

$$P(d) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } d \leq 0 \\ \frac{1 - e^{-\frac{d^2}{\sigma^2}}}{1 + e^{-\frac{d^2}{\sigma^2}}} & \text{wenn } d > 0 \end{cases} \quad (6.21)$$

Zur weiteren Berechnung des Anwendungsbeispiels wurde für jedes Kriterium die Präferenzfunktion Typ 5 (Kriterium mit linearer Präferenz und Indifferenzbereich) gewählt. Zur Berechnung des Präferenzschwellenwertes (p) wurde von der besten Ausprägung eines Kriteriums die Standardabweichung der Differenzen eines Kriteriums abgezogen. Zur Berechnung des Indifferenzschwellenwertes (q) wurde von der schlechtesten Ausprägung die Standardabweichung der Differenzen eines Kriteriums abgezogen.

3. Ermittlung der subjektiven Kriteriengewichtung

Zur Gewichtung der normierten Entscheidungsmatrix werden subjektive Kriteriengewichte benötigt. Diese gewichteten Kriterien spiegeln die Präferenzen des Entscheidungsträgers wider.

Folgende Kriteriengewichtung wurde angenommen:

Tabelle 6.27: Subjektive Gewichtung der Kriterien

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
Gewichtung	32%	10%	21%	14%	4%	3%	14%	2%

¹⁰Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung [Geldermann2014]

6.6 Preference ranking organization method for enrichment of evaluations

$$\pi(A_k, A_i) = \sum_{i=1}^n w_i * P_d \quad (6.22)$$

Um die Outranking-Relationen berechnen zu können, müssen neben dem Präferenzwert, dem Indifferenzwert auch die subjektiven Kriteriengewichte festgelegt werden.

4. Bestimmung der Outranking-Relationen

Tabelle 6.28: Berechnung der Präferenzen auf Basis der Präferenzfunktion Typ 5

K1	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F1	0,00	1,00	0,65	1,00	0,58	0,88
F2	0,00	0,00	0,05	0,88	0,00	0,27
F3	0,35	0,95	0,00	1,00	0,42	0,73
F4	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
F5	0,42	1,00	0,58	1,00	0,00	0,80
F6	0,12	0,73	0,27	1,00	0,20	0,00

K2	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F1	0,00	0,30	0,24	0,73	0,45	0,62
F2	0,16	0,00	0,17	0,66	0,39	0,55
F3	0,22	0,29	0,00	0,72	0,45	0,61
F4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12
F5	0,01	0,07	0,02	0,51	0,00	0,39
F6	0,00	0,00	0,00	0,35	0,07	0,00

5. Berechnung der Aus- und Eingangsflüsse

Nachdem die Outranking-Relationen bestimmt wurden werden die Aus- und Eingangsflüsse (ϕ) berechnet. Mit der Differenz von ϕ^+ und ϕ^- ergibt sich das Ranking der Alternativen. Die beste Alternative ist jene mit dem höchsten ϕ -Wert.

Tabelle 6.29: Berechnung des Präferenzindex jeder Alternative

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
F1	0,00	0,60	0,41	0,71	0,48	0,53
F2	0,05	0,00	0,12	0,56	0,21	0,22
F3	0,26	0,55	0,00	0,67	0,39	0,45
F4	0,03	0,13	0,08	0,00	0,11	0,06
F5	0,24	0,49	0,29	0,60	0,00	0,42
F6	0,15	0,44	0,23	0,63	0,29	0,00

$$\phi^+(A_j) = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m \pi(A_j, A_k) \quad (6.23)$$

$$\phi^-(A_j) = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m \pi(A_k, A_j) \tag{6.24}$$

6. Aggregation und Auswertung

$$\phi(A_j) = \phi^+(A_j) - \phi^-(A_j) \tag{6.25}$$

Tabelle 6.30: Lösung des Entscheidungsproblem mittels PROMETHEE

	Sigma +	Sigma -	Sigma			
F1	0,54	0,15	0,40	Rang 1	F1	0,40
F2	0,23	0,44	-0,21	Rang 2	F3	0,24
F3	0,46	0,23	0,24	Rang 3	F5	0,11
F4	0,08	0,63	-0,55	Rang 4	F6	0,01
F5	0,41	0,29	0,11	Rang 5	F2	-0,21
F6	0,35	0,34	0,01	Rang 6	F4	-0,55

6.6.2 Fazit zur Anwendung von PROMETHEE

Die PROMETHEE-Methode wird als eine der bekanntesten und am häufigsten verwendeten Methoden für Entscheidungen mit mehreren Kriterien eingestuft [Vojislav2013]. In Bezug auf die Baubranche basierend auf der durchgeführten Literaturrecherche platziert sich PROMETHEE im Mittelfeld der betrachteten Methoden (siehe Abbildung 5.13). PROMETHEE ist dem Bereich der Outranking-Verfahren zuzuordnen. Benötigte Elemente zur Anwendung von PROMETHEE sind eine vollständige Entscheidungsmatrix (Ziele, Alternativen, Kriterien und Kriteriengewichtungen) sowie die Angabe von Präferenzfunktionen.

Der Aufwand für den Entscheidungsträger wird bei der Festlegung der Kriteriengewichte durch die Präferenzfunktionen erleichtert. Dadurch ist es nicht erforderlich eindeutige Präferenzen abzubilden. Die paarweisen Vergleiche werden bei PROMETHEE anders als bei AHP oder ANP nicht über die 9-Punkte Skala von Saaty, sondern über eine Differenzwertbildung ermittelt. Mit dieser Vorgehensweise wird der Aufwand der paarweisen Vergleiche mittels der Präferenzfunktionen für den Entscheidungsträger erleichtert. Die Anwendung von PROMETHEE für mehrere Entscheidungsträger kann theoretisch dabei nur auf zwei Arten erfolgen. Durch das Errechnen eines Mittelwertes nachdem alle Entscheidungsträger die individuellen Kriteriengewichte abgearbeitet haben oder durch die Mittelwertberechnung der finalen Reihung. Bei der Berechnung einer gemeinsamen Kriteriengewichtung durch Mittelwertberechnung können auch Gewichte für einzelne Entscheidungsträger miteinbezogen werden, sofern deren Entscheidungskraft nicht

gleichmäßig verteilt sein sollte. Die dritte Möglichkeit - also das gemeinsame Erarbeiten einer Kriteriengewichtung mittels Präferenzfunktionen - wird aus Sicht des Autors als nicht anwendbare Möglichkeit in der Praxis eingestuft. Für den Entscheidungsträger spielt die Erweiterung des Entscheidungsproblems um Alternativen keine Rolle. Bei der Erweiterung von Kriterien müssen weitere Präferenzfunktionen und eine neue Kriteriengewichtung festgelegt werden. Auch bei PROMETHEE werden Wechselwirkungen zwischen Kriterien nicht berücksichtigt. Im Detail ist damit gemeint, dass ein Kriterium ein weiteres oder mehrere weitere positiv bzw. negativ beeinflussen kann und es somit durch Schleifen zu anderen Kriteriengewichtungen kommen kann.

Zur Durchführung von PROMETHEE sind derzeit freie aber auch kommerzielle Softwareprodukte am Markt verfügbar. Eine der gängigsten Methoden zur Visualisierung von PROMETHEE ist GAIA. Ein abschließender, taxativer Überblick über Softwareprodukte wird im Kapitel 7.2 dargestellt.

6.7 Simple Additive Weighting

Simple Additive Weighting (SAW), das auch als gewichtete lineare Kombination oder additives Bewertungsverfahren bezeichnet wird, ist eine einfache und häufig angewendete multikriterielle Entscheidungsmethode. Das Grundkonzept der SAW-Methode besteht darin die gewichtete Summe der Leistungswerte für jede Alternative über alle Kriterien zu ermitteln [Kusumadewi2006]. Die SAW-Methode erfordert die Normierung der Entscheidungsmatrix X auf einen Maßstab der mit allen vorhandenen Leistungswerten vergleichbar ist. Für jede Alternative wird eine Bewertungspunktzahl berechnet, indem der skalierte Wert, der für die Alternative des Kriteriums angegeben wird, mit den Gewichtungen der relativen Wichtigkeit (mit den Präferenzen des Entscheidungsträgers) multipliziert wird, gefolgt von der Summierung der Produkte aller Kriterien. Der Vorteil dieser Methode ist, dass es sich um eine proportionale lineare Transformation der Rohdaten handelt. Das heißt die relative Größenordnung der standardisierten Bewertungen bleibt gleich. Der SAW-Prozess besteht aus folgenden Schritten:

1. Definition der Entscheidungsmatrix
2. Normierung und Gewichtung der Entscheidungsmatrix
3. Berechnung der Summen jeder Alternative

6.7.1 Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle

1. Definition der Entscheidungsmatrix

Zur Anwendung von SAW wird eine vollständige Entscheidungsmatrix benötigt. Dazu müssen die Alternativen, die Kriterien sowie die Leistungsbewertungen festgelegt sein.

Tabelle 6.31: Entscheidungsmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	120	2058,5	0,16	0,33	0,75	1	1	3
F2	200	2350,0	0,24	0,40	1,57	2	2	3
F3	140	2099,0	0,17	0,23	1,00	4	3	2
F4	250	4190,0	0,35	0,43	0,93	4	2	2
F5	130	3015,0	0,30	0,20	0,60	1	4	1
F6	170	3700,0	0,21	0,28	1,70	3	1	4

6.7 Simple Additive Weighting

2. Normierung und Gewichtung der Entscheidungsmatrix

Die Normierung der Entscheidungsmatrix wird in Abhängigkeit des Optimierungsziels (Maximierungskriterium bzw. Minimierungskriterium) durchgeführt.

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})} & \text{wenn } j \text{ ein Maximierungskriterium ist} \\ \frac{x_{ij}}{\min(x_{ij})} & \text{wenn } j \text{ ein Minimierungskriterium ist} \end{cases} \quad (6.26)$$

Tabelle 6.32: Normierung der Entscheidungsmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	1,00	1,00	1,00	0,61	0,80	0,25	0,25	0,75
F2	0,60	0,88	0,67	0,50	0,38	0,50	0,50	0,75
F3	0,86	0,98	0,94	0,87	0,60	1,00	0,75	0,50
F4	0,48	0,49	0,46	0,47	0,65	1,00	0,50	0,50
F5	0,92	0,68	0,53	1,00	1,00	0,25	1,00	0,25
F6	0,71	0,56	0,76	0,71	0,35	0,75	0,25	1,00

Zur Gewichtung der normierten Entscheidungsmatrix werden subjekte Kriteriengewichte benötigt. Diese gewichteten Kriterien spiegeln die Präferenzen des Entscheidungsträgers wider.

Folgende Kriteriengewichtung wurde angenommen:

Tabelle 6.33: Subjektive Gewichtung der Kriterien

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
Gewichtung	32%	10%	21%	14%	4%	3%	14%	2%

$$V_i = \sum_{j=1}^n w_j * r_{ij} \quad (6.27)$$

3. Berechnung der Summen jeder Alternative

Tabelle 6.34: Lösung des Entscheidungsproblems mittels SAW

		Ergebnis		
F1	0,80	Rang 1	F3	0,86
F2	0,60	Rang 2	F5	0,81
F3	0,86	Rang 3	F1	0,80
F4	0,50	Rang 4	F6	0,63
F5	0,81	Rang 5	F2	0,60
F6	0,63	Rang 6	F4	0,50

6.7.2 Fazit zur Anwendung von SAW

SAW wird wie der AHP, der ANP und MEW den wert-basierten Techniken (utility-based techniques) zugeordnet. Trotz der sehr simplen Anwendung aus mathematischer Sicht liegt die Methode SAW im Vergleich zu den anderen angewandten MCDM-Methoden im Zuge der Baubranche auf Basis der durchgeführten Literaturrecherche nur im hinteren Mittelfeld (siehe Abbildung 5.13). SAW ist neben MEW die zeitlichst unaufwendigste Methode, sowohl für den Entscheidungsträger als auch für den Analysten. Benötigte Elemente zur Anwendung von SAW sind Ziele, Kriterien, Kriteriengewichtungen sowie Alternativen. Der Aufwand für den Entscheidungsträger beschränkt sich bei der Anwendung von SAW lediglich auf des Festlegen der Kriteriengewichtungen, vorausgesetzt der Analyst ermittelt die vollständige Entscheidungsmatrix mit den notwendigen Leistungswerten.

Bei SAW findet keine Gegenüberstellung von Alternativen oder Kriterien anhand von paarweisen Vergleichen oder anderen Vergleichsmethoden statt. Es werden lediglich die festgelegten Kriteriengewichte in die Entscheidungsunterstützung miteinbezogen.

Die Anwendung von SAW für mehrere Entscheidungsträger kann theoretisch wie bei allen anderen nicht-gruppenorientierten Entscheidungsmethoden auf drei Arten erfolgen. Das gemeinsame Erarbeiten der Kriteriengewichtungen, was aus Sicht der praktischen Anwendung eher aufwendig erscheint, durch das Errechnen eines Mittelwertes nachdem alle Entscheidungsträger die individuellen Kriteriengewichte festgelegt haben - bei der Berechnung einer gemeinsamen Kriteriengewichtung durch Mittelwertberechnung können auch Gewichte für einzelne Entscheidungsträger miteinbezogen werden, sofern deren Entscheidungskraft nicht gleichmäßig verteilt sein sollte - oder durch die Mittelwertbildung der finalen Alternativenreihung. Auch die Erweiterbarkeit der Entscheidungsmatrix stellt keinen großen Aufwand dar. Dabei wird lediglich eine neue Festlegung der Kriteriengewichte notwendig.

Wie bei den meisten multikriteriellen Entscheidungsmethoden besteht ein Nachteil im Vernachlässigen von Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Kriterien. Im Detail ist damit gemeint, dass ein Kriterium ein weiteres oder mehrere weitere positiv bzw. negativ beeinflussen kann und es somit durch Schleifen zu anderen Kriteriengewichtungen kommen kann.

Zur Durchführung von SAW sind derzeit freie aber auch kommerzielle Softwareprodukte am Markt verfügbar. Ein abschließender, taxativer Überblick über Softwareprodukte wird im Kapitel 7.2 dargestellt.

6.8 Superiority and Inferiority Ranking

Das Superiority and Inferiority-Verfahren (SIR) ist ein Entscheidungsmodell zur Lösung von Entscheidungsproblemen mit mehreren Kriterien, welches sechs verschiedene Präferenzstrukturen für den Systembenutzer bereitstellt. SIR wurde 1993 von *Rebai* definiert und in den Themenbereich der multikriteriellen Entscheidungsmethoden eingeführt [**Rebai:1993aa**], [**Rebai:1994aa**]. Die Methode selbst entstand erst 2001 als *Xu* eine allgemeingültige Notation für Superiority- und Inferiority-Werte definierte, welche Unterschiede von Leistungswerten von Kriterien und Unterschiede von Kriterientypen miteinbezog [**Xu:2001aa**]. Die SIR-Methode fasst die Stärken der meisten multikriteriellen Entscheidungsmodelle im Umgang mit nicht quantifizierbaren, kardinalen und/oder ordinalen Daten zusammen und ermöglicht ungenaue Informationen durch die Einführung von Konzepten wie Gleichgültigkeits- und Präferenzschwellen für jedes Kriterium. Darüber hinaus ist die Methode in der Lage, mit Daten in verschiedenen Einheiten umzugehen [**Tam:2004aa**].

6.8.1 Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle

Die SIR-Methode umfasst im wesentlichen vier Schritte. Im ersten Schritt werden die Leistungswerte der Kriterien für jede Alternative verglichen, um die Superiority-Werte und Inferiority-Werte zu verallgemeinern. In Schritt zwei werden die Superiority-Matrix S und die Inferiority-Matrix I , welche aus Superiority-Indizes und Inferiority-Indizes bestehen, entwickelt. Der dritte Schritt bezieht sich auf die Datenaggregation. Diese Funktion ermöglicht dem Entscheidungsträger mehr Auswahlmöglichkeiten zu haben. Schließlich im vierten Schritt, werde die Superiority- und Inferiority-Ströme verwendet, um die Alternativen zu bewerten.

1. Festlegen der Entscheidungsmatrix

Tabelle 6.35: Entscheidungsmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	120	2058,5	0,16	0,33	0,75	1	1	3
F2	200	2350,0	0,24	0,40	1,57	2	2	3
F3	140	2099,0	0,17	0,23	1,00	4	3	2
F4	250	4190,0	0,35	0,43	0,93	4	2	2
F5	130	3015,0	0,30	0,20	0,60	1	4	1
F6	170	3700,0	0,21	0,28	1,70	3	1	4

2. Bestimmung der S- und I-Indizes sowie Berechnung der S- und I-Matrizen

$$S_j(A_i) = \sum_{k=1}^m f_j * (g_j(A_i) - g_j(A_k)) \tag{6.28}$$

$$f(d) = \begin{cases} 1 - \exp(-d^2/2\sigma^2) & \text{wenn } d > 0 \\ 0 & \text{wenn } d < 0 \end{cases} \tag{6.29}$$

Tabelle 6.36: S-Matrix

F1	0,00	0,00	0,00	1,22	0,06	0,00	0,00	1,57
F2	2,05	0,09	0,87	2,55	2,93	0,46	0,61	1,57
F3	0,10	0,00	0,01	0,05	0,49	2,70	2,15	0,37
F4	3,96	3,48	3,60	3,10	0,32	2,70	0,61	0,37
F5	0,02	1,09	2,40	0,00	0,00	0,00	3,77	0,00
F6	0,84	2,56	0,33	0,45	3,38	1,53	0,00	3,39

$$I_j(A_i) = \sum_{k=1}^m f_j * (g_j(A_k) - g_j(A_i)) \tag{6.30}$$

Tabelle 6.37: I-Matrix

F1	2,19	2,25	2,43	0,70	1,94	2,70	2,34	0,37
F2	0,40	1,81	0,94	0,05	0,04	1,53	1,07	0,37
F3	1,60	2,19	2,21	2,31	1,27	0,00	0,31	1,57
F4	0,00	0,00	0,00	0,00	1,43	0,00	1,07	1,57
F5	1,88	0,84	0,20	2,86	2,49	2,70	0,00	3,39
F6	0,90	0,14	1,42	1,45	0,00	0,46	2,34	0,00

3. Festlegen der Kriteriengewichtung

Zur Gewichtung der normierten Entscheidungsmatrix werden subjekte Kriteriengewichte benötigt. Diese gewichteten Kriterien spiegeln die Präferenzen des Entscheidungsträgers wider.

Folgende Kriteriengewichtung wurde angenommen:

Tabelle 6.38: Subjektive Gewichtung der Kriterien

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
Gewichtung	32%	10%	21%	14%	4%	3%	14%	2%

$$\phi > (A_i) = \sum_{j=1}^n w_j * S_j(A_i) \tag{6.31}$$

6.8 Superiority and Inferiority Ranking

$$\phi < (A_i) = \sum_{j=1}^n w_j * I_j(A_i) \tag{6.32}$$

Tabelle 6.39: Superiority und Inferiority-Ströme

	$\phi > A_i$	$\phi < A_i$
F1	0,204	2,030
F2	1,452	0,718
F3	0,449	1,644
F4	2,990	0,239
F5	1,147	1,375
F6	0,908	1,144

4. Datenaggregation und Lösen des Entscheidungsproblems

$$R_i = \phi > (A_i) - \phi < (A_i) \tag{6.33}$$

Tabelle 6.40: Lösung des Entscheidungsproblems mittels SIR

	$(\phi > A_i) - (\phi < A_i)$			
F1	-1,83	Rang 1	F1	-1,83
F2	0,73	Rang 2	F3	-1,20
F3	-1,20	Rang 3	F6	-0,24
F4	2,75	Rang 4	F5	-0,23
F5	-0,23	Rang 5	F2	0,73
F6	-0,24	Rang 6	F4	2,75

6.8.2 Fazit zur Anwendung von SIR

SIR wird wie der AHP, der ANP, MEW und SAW den wert-basierten Techniken (utility-based techniques) zugeordnet. Die Ermittlung der Superiority- und Inferiority-Matrix erfordert einige zuvor durchgeführte Berechnungsschritte. Vergleicht man somit die Anzahl der notwendigen mathematischen Zwischenschritte um ein Ergebnis zu erzielen, gehört SIR zu den eher aufwendigeren multikriteriellen Entscheidungsmethoden. Im Vergleich mit den anderen angewandten MCDM-Methoden im Zuge der Baubranche auf Basis der durchgeführten Literaturrecherche reiht sich die Methode SIR im hinteren Bereich ein (siehe Abbildung 5.13). Wie bei vielen anderen multikriteriellen Entscheidungsmethoden muss der Entscheidungsträger in der Lage sein eine vollständige Entscheidungsmatrix festzulegen bzw. dem Analysten Experten zur Verfügung stellen, welche die Entscheidungsmatrix vollständig erarbeiten können. Benötigte Elemente zur Anwendung von SIR sind Ziele, Kriterien, Kriteriengewichtungen sowie Alternativen. Bei SIR findet keine Gegenüberstellung von Alternativen oder Kriterien anhand von paarweisen Vergleichen oder anderen Vergleichsmethoden statt. Bei SIR werden für alle Kriterien die Diffe-

renzen für jeden Leistungswert einer Alternative zu einer weiteren Alternative berechnet. Die Anwendung von SIR für mehrere Entscheidungsträger kann theoretisch wie bei allen anderen nicht-gruppenorientierten Entscheidungsmethoden auf drei Arten erfolgen. Das gemeinsame Erarbeiten der Kriteriengewichtungen, was aus Sicht der praktischen Anwendung eher aufwendig erscheint, durch das Errechnen eines Mittelwertes nachdem alle Entscheidungsträger die individuellen Kriteriengewichte festgelegt haben - bei der Berechnung einer gemeinsamen Kriteriengewichtung durch Mittelwertberechnung können auch Gewichte für einzelne Entscheidungsträger miteinbezogen werden, sofern deren Entscheidungskraft nicht gleichmäßig verteilt sein sollte - oder durch die Mittelwertbildung der finalen Alternativenreihung.

Wie bei den meisten multikriteriellen Entscheidungsmethoden besteht ein Nachteil im Vernachlässigen von Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Kriterien. Im Detail ist damit gemeint, dass ein Kriterium ein weiteres oder mehrere weitere positiv bzw. negativ beeinflussen kann und es somit durch Schleifen zu anderen Kriteriengewichtungen kommen kann.

Zur Durchführung von SIR sind derzeit freie aber auch kommerzielle Softwareprodukte am Markt verfügbar. Ein abschließender, taxativer Überblick über Softwareprodukte wird im Kapitel 7.2 dargestellt.

6.9 Technique for order of preference by similarity to ideal solution

TOPSIS ist eine bekannte und klassische MCDA-Methode, die ursprünglich von *Hwang und Yoon* im Jahr 1981 entwickelt wurde [**Yoon1995**]. Wie *Zavadskas et. al* feststellten, ist die TOPSIS-Methode die zweitbeliebteste Methode unter den Entscheidungsverfahren zur Lösung von Entscheidungsproblemen mit mehreren Kriterien [**Zavadskas2015**].

Bei der klassischen TOPSIS-Methode wird davon ausgegangen, dass Bewertungen der Alternativen und Kriteriengewichtungen durch numerische Daten dargestellt sind und das Entscheidungsprobleme von einem einzigen Entscheidungsträger gelöst werden. Komplexität entsteht, wenn es mehr als einen Entscheidungsträger gibt, weil Gruppen oftmals andere Ziele haben. In ihren Grundlagen sind die Alternativen nach ihren Entfernungen von positiven und negativen Ideallösungen geordnet, das heißt die beste Alternative ist diejenige, die den kürzesten Abstand von der Ideallösung hat [**Roghanian:2010aa**]. Diese Methode berücksichtigt gleichzeitig die Entfernungen sowohl zu positiven als auch zu negativen Ideallösungen, und eine Präferenzordnung wird basierend auf ihrer relativen Nähe und der Kombination dieser beiden Entfernungsmaße eingestuft [**Yue:2011aa**]. Für die positive Ideallösung wird sie mit einer „hypothetischen Alternative“ gegenübergestellt, die die besten Bewertungen für alle betrachteten Kriterien aufweist, während für den Fall der negativen Ideallösung die „hypothetische Alternative“ die schlechtesten Kriterien aufweist [**Roghanian:2010aa**], [**Yue:2011aa**].

Die Anwendung dieser Methode erfordert, dass:

- alle Leistungswerte von Kriterien numerisch sind,
- diese monoton zu- oder abnehmen,
- und dass alle Kriterien entsprechende Einheiten aufweisen.

Diese Methode wurde in verschiedenen Anwendungen erfolgreich angewendet und funktioniert noch immer zufriedenstellend [**Behzadian:2012aa**]. Die Implementierung in realen Anwendungen umfasst beispielsweise den elektronischen Handel [**Kang:2016aa**], die Industrie [**Shaverdi:2016aa**], das Gesundheitswesen [**Viyanchi:2016aa**], das Abfallmanagement [**Aghajani-Mir:2016aa**], die Lieferantenauswahl [**Wood:2016aa**], das Risikomanagement [**Mahdevari:2014aa**], die erneuerbare Energie [**Sengul:2015aa**], den Klimawandel [**Kim:2013aa**] oder die Nachhaltigkeitsbewertung [**Mulliner:2016aa**]. Fuzzy-Erweiterungen der TOPSIS-Methode wurden von Forschern vorgeschlagen, um die Unbestimmtheit zu erfassen und Unsicher-

heiten zu beseitigen, die den Leistungswerten und menschlichen Urteilen zugrunde liegen [Roghanian:2010aa].

6.9.1 Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle

Die Anwendung von TOPSIS umfasst folgende Schritte:

- Festlegen der Entscheidungsmatrix
- Normierung der Entscheidungsmatrix
- Festlegen der Kriteriengewichtungen und Gewichtung der normierten Entscheidungsmatrix
- Ermittlung der positiven und negativen Extremwertlösungen (Ideallösungen)
- Ermittlung der geringsten Abweichung zur positiven Ideallösung

1. Festlegen der Entscheidungsmatrix

Tabelle 6.41: Entscheidungsmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	120	2058,5	0,16	0,33	0,75	1	1	3
F2	200	2350,0	0,24	0,40	1,57	2	2	3
F3	140	2099,0	0,17	0,23	1,00	4	3	2
F4	250	4190,0	0,35	0,43	0,93	4	2	2
F5	130	3015,0	0,30	0,20	0,60	1	4	1
F6	170	3700,0	0,21	0,28	1,70	3	1	4

2. Normierung der Entscheidungsmatrix

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \tag{6.34}$$

Tabelle 6.42: Normierung der Entscheidungsmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	0,281	0,279	0,264	0,417	0,263	0,146	0,169	0,457
F2	0,468	0,318	0,395	0,506	0,550	0,292	0,338	0,457
F3	0,328	0,284	0,280	0,291	0,350	0,583	0,507	0,305
F4	0,586	0,568	0,576	0,544	0,326	0,583	0,338	0,305
F5	0,304	0,408	0,494	0,253	0,210	0,146	0,676	0,152
F6	0,398	0,501	0,346	0,354	0,596	0,438	0,169	0,610

3. Festlegen der Kriteriengewichtungen und Gewichtung der normierten Entscheidungsmatrix

Zur Gewichtung der normierten Entscheidungsmatrix werden subjekte Kriteriengewichte benötigt. Diese gewichteten Kriterien spiegeln die Präferenzen des Entscheidungsträgers

6.9 Technique for order of preference by similarity to ideal solution

wider.

Folgende Kriteriengewichtung wurde angenommen:

Tabelle 6.43: Subjektive Gewichtung der Kriterien

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
Gewichtung	32%	10%	21%	14%	4%	3%	14%	2%

$$v_{ij} = w_j * n_{ij} \tag{6.35}$$

Tabelle 6.44: Gewichtung der normierten Entscheidungsmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	0,090	0,028	0,055	0,058	0,011	0,004	0,024	0,009
F2	0,150	0,032	0,083	0,071	0,022	0,009	0,047	0,009
F3	0,105	0,028	0,059	0,041	0,014	0,018	0,071	0,006
F4	0,187	0,057	0,121	0,076	0,013	0,018	0,047	0,006
F5	0,097	0,041	0,104	0,035	0,008	0,004	0,095	0,003
F6	0,127	0,050	0,073	0,050	0,024	0,013	0,024	0,012

4. Ermittlung der positiven und negativen Extremwertlösungen (Ideallösungen)

$$V^+ = \max[v_{ij}] \tag{6.36}$$

$$V^- = \min[v_{ij}] \tag{6.37}$$

Tabelle 6.45: Ermittlung der positiven und negativen Ideallösungen

V+	0,090	0,028	0,055	0,035	0,008	0,004	0,024	0,003
V-	0,187	0,057	0,121	0,076	0,024	0,018	0,095	0,012

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \tag{6.38}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \tag{6.39}$$

5. Ermittlung der geringsten Abweichung zur positiven Ideallösung

$$R_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+} \tag{6.40}$$

6.9.2 Fazit zur Anwendung von TOPSIS

Es gibt verschiedene multikriterielle Entscheidungsmethoden, um die Auswahl unter Bedingungen mit mehreren Kriterien zu erleichtern. Eine davon ist die TOPSIS-Methode, bei der die

Tabelle 6.46: Lösung des Entscheidungsproblems mittels TOPSIS

	Sj+	Sj-	Pi			
F1	0,02	0,14	0,86	Rang 1	F1	0,86
F2	0,08	0,08	0,49	Rang 2	F3	0,69
F3	0,05	0,12	0,69	Rang 3	F6	0,67
F4	0,13	0,05	0,27	Rang 4	F5	0,54
F5	0,09	0,10	0,54	Rang 5	F2	0,49
F6	0,05	0,11	0,67	Rang 6	F4	0,27

Rangfolge der Alternativen auf der relativen Ähnlichkeit mit der idealen Lösung basiert, wodurch vermieden wird, dass der gleiche Ähnlichkeitsindex sowohl für positive als auch für negative ideale Lösungen besteht. Die TOPSIS-Methode ist eine praktische und nützliche Methode für die Reihung und Auswahl von Alternativen. TOPSIS wird in der vorgenommenen Einteilung der MCDM-Methoden zu den Kompromissmethoden (compromise methods) zugeordnet. Die hohe Flexibilität des TOPSIS-Konzepts ermöglicht weitere Erweiterungen, um in verschiedenen Situationen die beste Wahl zu treffen. In der Praxis werden TOPSIS und seine Modifikationen verwendet, um viele theoretische und reale Probleme zu lösen. Darüber hinaus können die Präferenzen von mehreren Entscheidungsträgern auch im TOPSIS-Verfahren zusammengefasst werden. Im Vergleich mit den anderen angewandten MCDM-Methoden im Zuge der Baubranche auf Basis der durchgeführten Literaturrecherche reiht sich die Methode TOPSIS nach dem AHP an zweiter Stelle der berücksichtigten Methoden ein (siehe Abbildung 5.13). Dies deckt sich somit auch mit der Aussage von [Zavadskas2015]. Auch die Entwicklung der letzten Jahre zeigt einen deutlichen Anstieg bei der Anwendung und Weiterentwicklung dieser Methode. Benötigte Elemente zur Anwendung von TOPSIS sind Ziele, Kriterien, Kriteriengewichtungen sowie Alternativen - das heißt eine vollständige Entscheidungsmatrix. Bei TOPSIS findet keine Gegenüberstellung von Alternativen oder Kriterien anhand von paarweisen Vergleichen oder anderen Vergleichsmethoden statt. Bei TOPSIS werden für alle Kriterien Minimum- und Maximumwerte bestimmt und in weiterer Folge damit die Abweichungen zu Ideallösungen berechnet. Die Erweiterbarkeit der Entscheidungsmatrix stellt nur dann einen größeren Aufwand dar, wenn das Hinzufügen von Kriterien die Minimum- und Maximumwerte verändert. Ist dies der Fall müssen alle Berechnungsschritte erneut durchgeführt werden. Wie bei den meisten multikriteriellen Entscheidungsmethoden besteht ein Nachteil im Vernachlässigen von Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Kriterien. Im Detail ist damit gemeint, dass ein Kriterium ein weiteres oder mehrere weitere positiv bzw. negativ beeinflussen kann und es somit durch Schleifen zu anderen Kriteriengewichtungen kommen kann. Zur Durchführung von TOPSIS sind derzeit freie aber auch kommerzielle Softwareprodukte am Markt verfügbar. Ein abschließender, taxativer Überblick über Softwareprodukte wird im Kapitel 7.2 dargestellt.

6.10 Utilités additives

Die meist verwendeten Techniken wie SAW, AHP oder TOPSIS basieren auf direkt bevorzugten Informationen, die vom Entscheidungsträger eine klare und genaue Definition aller Parameter des Präferenzmodells erfordern, so dass diese Techniken bei gut strukturierten Entscheidungsproblemen anwendbar sind. Mit UTA wurde eine Methode entwickelt, welche auch bei schlecht strukturierten Entscheidungsproblemen anwendbar ist.

Die UTA-Methode (UTilités Additives) wurde von *Jacquet-Lagreze* und *Siskos* vorgeschlagen [**Jacquet-Lagreze:1982aa**], um auf eine oder mehrere additive Wertefunktionen aus einer gegebenen Rangfolge aus einer Referenzmenge zu schließen.

UTA-Methoden beziehen sich auf die Philosophie der Bewertung von Wert- oder Nutzfunktionen (value functions or utility functions), welche auf der Basis von der Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) aufbauen und das Prinzip der Disaggregationspräferenz (preference disaggregation principle) adaptieren. Der Disaggregationsansatz [**Jacquet-Lagreze:1982aa**], [**Jacquet-Lagreze:2001aa**] zielt darauf ab, das Verhalten und den kognitiven Stil der Entscheidung des Entscheidungsträgers zu analysieren. Die Geschichte des Disaggregationsprinzips in multikriteriellen Analysen hat seine Anfänge im Einsatz von Zielprogrammierungstechniken (goal programming techniques), einer speziellen Form einer linearen Programmierstruktur, mit der Ableitung von Präferenz- / Aggregationsmodellen oder der Entwicklung von linearen oder nichtlinearen multidimensionalen Regressionsanalysen. *Charnes et al.* [**Charnes:1955aa**] schlug ein lineares Modell für die optimale Schätzung der Vergütung von Führungskräften vor, indem paarweise Vergleiche und vorgegebene Maßnahmen (Gehälter) analysiert oder disaggregiert wurden. *Karst* [**Karst:1958aa**] minimierte die Summe der absoluten Abweichungen durch Zielprogrammierung in der linearen Regression mit einer Variablen, während *Wagner* [**Wagner:1959aa**] das Modell von *Karst* im Fall der multiplen Regression verallgemeinerte. Die UTA-Methode verwendet Techniken der linearen Programmierung, um additive Wert- / Nutzenfunktionen optimal abzuleiten, so dass diese Funktionen so konsistent wie möglich mit den Präferenzen der Entscheidungsträger sind. Die Philosophie der Präferenzdisaggregation zielt darauf ab Präferenzmodelle aus gegebenen Präferenzstrukturen zu beurteilen und unterstützt Entscheidungshilfeaktivitäten durch operationelle Modelle. Das Ziel dieses Ansatzes ist es, den Entscheidungsträgern dabei zu helfen, ihr Wissen über die Entscheidungssituation und die Art und Weise von getroffenen Präferenzen zu verbessern, um eine konsistente Entscheidung zu erreichen [**Siskos:2005aa**].

Der UTA-Algorithmus wurde für verschiedene Entscheidungsprobleme verbessert und erweitert was zu einer Familie von UTA-Methoden führte. Ein detaillierter Überblick über die Methoden der UTA-Familie ist in [Siskos:2005aa] dargestellt.

In der UTA-Technik bezieht sich der Präferenzdisaggregationsansatz auf die Analyse (Disaggregation) der globalen Präferenzen (Urteilspolitik) der Entscheidungsträger, um das Kriterienaggregationsmodell zu identifizieren, welches dem Präferenzergebnis zugrunde liegt.

Um UTA anzuwenden müssen folgenden Voraussetzungen gegeben sein:

1. Entscheidungsalternativen
2. Teilmenge von Entscheidungsalternativen (vor allem bei einer großen Anzahl von Alternativen)
3. Fiktive Entscheidungsalternativen, welche leicht zu bewerten sind
4. Kriterien
5. Kriteriengewichtungen

6.10.1 Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle

Die Anwendung von UTA mittels Berechnung in Excel wurde aufgrund des mathematischen Umfanges nicht durchgeführt. Aus diesem Grund wird eine Software zur Lösung des Entscheidungsproblems angewandt.

Mittels des Softwaretools Diviz¹¹ können unterschiedliche MCDM-Methoden angewandt werden. Dies ist möglich, da es für einige MCDM-Methode Module gibt, welche innerhalb der Software Diviz implementiert werden können.

Im ersten Schritt beschreiben die Entscheidungsträger eine Menge von Kriterien mit nicht abnehmenden, erschöpfenden und nicht redundanten Wertefunktionen. Im nächsten Schritt werden spezielle Techniken der linearen Programmierung verwendet. Dadurch werden eine globale und mehrere partielle additive Hilfsfunktionen von einer gegebenen Rangfolge der Referenzoptionen erhalten. Am Ende erfolgt eine Stabilitätsanalyse als Nachoptimierungsschritt.

¹¹<https://www.diviz.org>, Zugriff am 26.07.2019

6.10 Utilités additives

UTA umfasst folgende Schritte:

1. Definition der Entscheidungsmatrix
2. Normierung der Entscheidungsmatrix
3. Festlegung einer Referenzreihung
4. Berechnung der stückweise linearen Abschnitte der Wertefunktionen (utility functions)
5. Berechnung der Nutzwerte (utility values)

1. Definition der Entscheidungsmatrix

Tabelle 6.47: Entscheidungsmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	120	2058,5	0,16	0,33	0,75	1	1	3
F2	200	2350,0	0,24	0,40	1,57	2	2	3
F3	140	2099,0	0,17	0,23	1,00	4	3	2
F4	250	4190,0	0,35	0,43	0,93	4	2	2
F5	130	3015,0	0,30	0,20	0,60	1	4	1
F6	170	3700,0	0,21	0,28	1,70	3	1	4

2. Normierung der Entscheidungsmatrix

Im nächsten schritt muss die Entscheidungsmatrix normiert werden. Für Kriterien, welche maximiert (beneficial attributes) werden sollen wird Formel 6.41 und für Kriterien, welche minimiert (non-beneficial attributes) werden sollen Formel 6.42 angewendet.

$$R_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})} \quad (6.41)$$

$$R_{ij} = \frac{\min(x_{ij})}{x_{ij}} \quad (6.42)$$

3. Festlegung einer Referenzreihung

Für die Reihung der Alternativen wird vom Entscheidungsträger im Zuge von Gesprächen mit dem Analysten ein Referenzranking erstellt.

Für die Berechnung in Diviz wurde folgendes Referenzranking vorgegeben:

Rang 1: Fiktives bestes Szenario (fictive best)

Rang 2: F1

Rang 3: F6

Rang 4: F4

Rang 5: Fiktives schlechtes Szenario (fictive worst)

4. Berechnung der stückweise linearen Abschnitte der Wertefunktionen (utility functions)

$$g_i^j = g_{i^*} + \frac{j-1}{\alpha_i - 1} (g_i^* - g_{i^*}) \quad (6.43)$$

5. Berechnung der Nutzwerte (utility values)

$$U_{(g)} = \sum_{i=1}^n u_i(g_i) \quad (6.44)$$

In Abbildung 6.14 wird der Aufbau des Modells in der Software Diviz dargestellt. Dabei müssen bei den türkisen Buttons die Inputparameter (Alternativen, Kriterien sowie eine Rangfolge der Alternativen) hinterlegt werden. Auf Basis dieser Informationen können in den grünen Buttons (hier sind alle erforderlichen Berechnungsschritte für UTA hinterlegt) die Wertfunktionen sowie die Lösung des Entscheidungsproblems berechnet werden.

¹²Screenshot aus der Software Diviz

6.10 Utilités additives

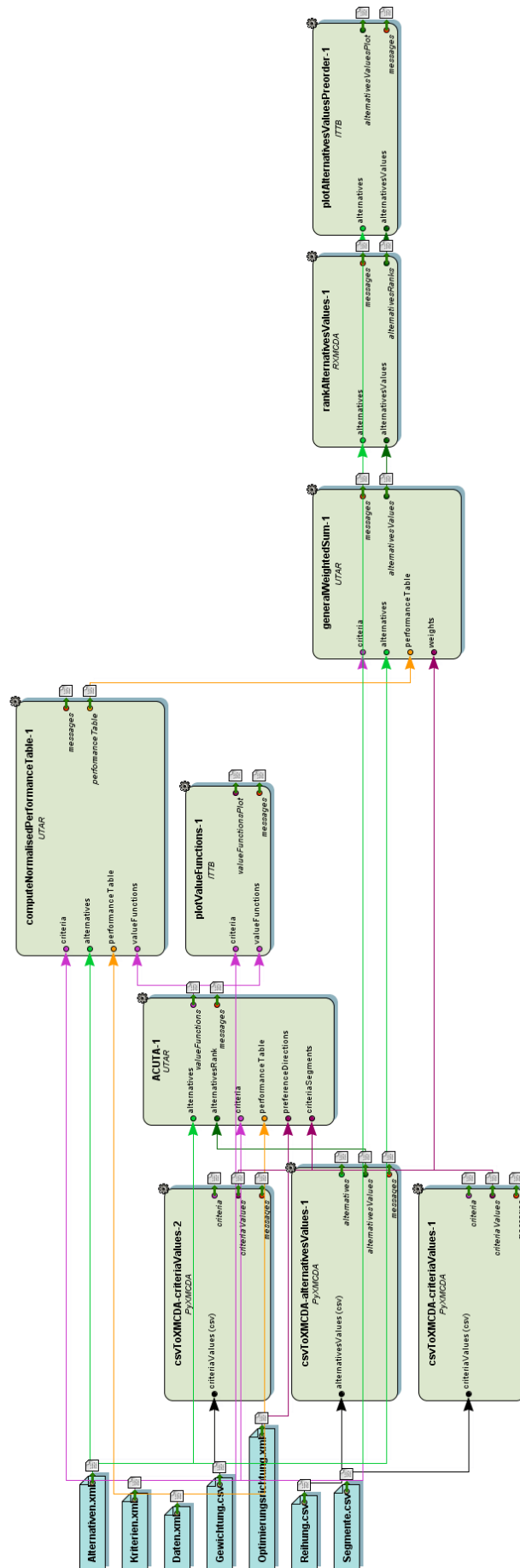


Abbildung 6.14: Aufbau des Modells in der Software Diviz¹²

Abschließend wird die Reihung der Alternativen ermittelt. Dabei stellt das fiktive beste Szenario stets den ersten und das fiktive schlechteste Szenario den letzten Rang dar.

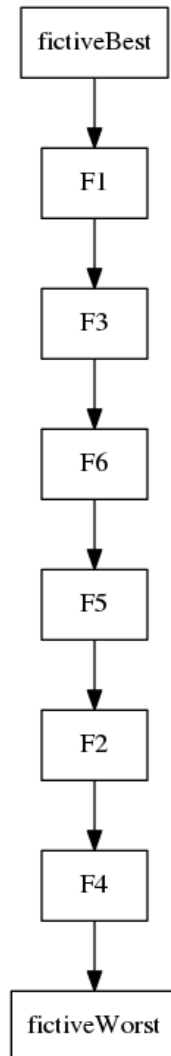


Abbildung 6.15: Lösung des Entscheidungsproblems mit der Software Diviz¹³

¹³Screenshot aus der Software Diviz

6.10.2 Fazit zur Anwendung von UTA

Die UTA-basierten Methoden wurden bei mehreren Entscheidungsproblemen in der Praxis angewandt. Bei Problemen in den Bereichen Risikokapitalbewertung, Portfolioauswahl und -verwaltung, Fehlervorhersage, Unternehmensfinanzierung, Länderrisikobewertung, Vermarktung neuer Produkte, Vermarktung von landwirtschaftlichen Produkten, Kundenzufriedenheit, Verkaufsstrategie Probleme, Arbeitsplatzbewertung, u.a.[Siskos:2005aa].

Wie einige der anderen betrachteten Methoden im Zuge dieser Masterarbeit wird auch UTA zu den wert-basierten Techniken (utility-based techniques) zugeordnet. Durch die Anwendung von UTA können Reihungsprobleme gelöst werden. Durch die aufwendigere Anwendung und der komplizierten mathematischen Berechnungen reiht sich UTA - auf Basis der durchgeführten systematischen Literaturrecherche - an zweitvorletzter Stelle der recherchierten Methoden ein. Benötigte Elemente zur Anwendung von UTA sind Ziele, Kriterien, Kriteriengewichtungen, Alternativen sowie ein bevorzugtes Ranking der Alternativen. Die zusätzliche Angabe eines bevorzugten Rankings im Vergleich zu den anderen MCDM-Methoden erklärt das schlechtere Abschneiden bei der Anwendung in der Baubranche. Die Erweiterbarkeit von Alternativen und Kriterien stellt bei der Anwendung von UTA einen eher größeren Aufwand dar. Dies liegt daran, dass bei der Erweiterung von Alternativen, neben der Ermittlung von weiteren Leistungswerten, auch eine neue bevorzugte Reihung der Alternativen anzugeben ist. Bei der Erweiterung von Kriterien muss wie bei den anderen betrachteten Methoden eine neue Kriteriengewichtung angegeben werden. Auch bei UTA werden direkte und indirekte Wechselwirkungen in die Reihung der Alternativen nicht miteinbezogen.

Zur Durchführung von UTA sind derzeit freie aber auch kommerzielle Softwareprodukte am Markt verfügbar. Ein abschließender, taxativer Überblick über Softwareprodukte wird im Kapitel 7.2 dargestellt.

6.11 Visekriterijumska Optimizacija I kompromismo resenje

Visekriterijumska Optimizacija I KOmpromisno Resenje-Methode (der serbische Name von VIKOR) bedeutet Multi-Kriterien-Optimierung und Kompromisslösung. Es ist eine multikriterielle Entscheidungsmethode, welche 1990 von *Serafim Opricovic* zur Lösung von Entscheidungsproblemen [**Opricovic2004**] mit widersprüchlichen Kriterien entwickelt wurde [**Duckstein**]. Diese Methode reiht Alternativen und bestimmt die Kompromisslösung, die dem Ideal am nächsten kommt.

Die Grundlage des Ansatzes der Kompromisslösung wurde von *Yu* [**Yu:1973aa**] und *Zeleny* [**Zeleny:1976aa**] geschaffen. Die VIKOR-Methode ermittelt die Kompromissliste und die Kompromisslösung, indem der Multi-Kriterien-Index anhand des jeweiligen Maßes der „Nähe“ zur „idealen“ Lösung eingeführt wird [**Opricovic2004**].

VIKOR ist ein hilfreiches Werkzeug in dem Bereich von Multi Attribute Decision Making (MADM), insbesondere in Situationen, in denen der Entscheidungsträger nicht in der Lage ist oder nicht weiß, wie man Präferenzen zu Beginn des Entscheidungsproblems zum Ausdruck bringt. Die erzielte Kompromisslösung bringt vor allem bei Gruppenentscheidungen den Vorteil, dass diese von den Entscheidungsträgern akzeptiert werden, da sie einen maximalen „Gruppennutzen der Mehrheit“ und ein Minimum an „individuellem Bedauern“ widerspiegelt [**Opricovic2004**], [**Tzeng:2005aa**].

6.11.1 Anwendungsbeispiel Planung der Gebäudehülle

Die Kompromissreihung von VIKOR besteht aus fünf Schritten, wobei n die Anzahl der Kriterien und m die Anzahl der Alternativen darstellen.

1. Festlegen der Entscheidungsmatrix
2. Identifikation der minimalen und maximalen Leistungswerte eines jeden Kriteriums
3. Ermittlung des Nützlichkeitsmaßes der Alternativen in Bezug auf jedes Kriterium
4. Ermittlung des Maßes des Bedauerns der Alternativen in Bezug auf jedes Kriterium
5. Priorisierung der Alternativen durch Berechnung der maximalen Zustimmung

6.11 Visekriterijumska Optimizacija I kompromiso resenje

Grundvoraussetzung ist eine vollständige Entscheidungsmatrix. Die Erstellung einer vollständigen Entscheidungsmatrix kann vom Entscheidungsträger oder beauftragten Experten erfolgen.

1. Festlegen der Entscheidungsmatrix

Tabelle 6.48: Entscheidungsmatrix

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
F1	120	2058,5	0,16	0,33	0,75	1	1	3
F2	200	2350,0	0,24	0,40	1,57	2	2	3
F3	140	2099,0	0,17	0,23	1,00	4	3	2
F4	250	4190,0	0,35	0,43	0,93	4	2	2
F5	130	3015,0	0,30	0,20	0,60	1	4	1
F6	170	3700,0	0,21	0,28	1,70	3	1	4

2. Identifikation der minimalen und maximalen Leistungswerte eines jeden Kriteriums

In einem nächsten Schritt werden die Minimum- und Maximumwerte jedes Kriteriums identifiziert.

$$f^+ = \max[a_{ij}] \tag{6.45}$$

$$f^- = \min[a_{ij}] \tag{6.46}$$

Tabelle 6.49: MIN- und MAX-Werte der Kriterien

f+	250	4190,0	0,35	0,43	1,70	4	4	4
f-	120	2058,5	0,16	0,20	0,60	1	1	1

3. Festlegen der Kriteriengewichtung und normieren der Entscheidungsmatrix

Zur Gewichtung der normierten Entscheidungsmatrix werden subjektive Kriteriengewichte benötigt. Diese gewichteten Kriterien spiegeln die Präferenzen des Entscheidungsträgers wider.

Folgende Kriteriengewichtung wurde angenommen:

Tabelle 6.50: Subjektive Gewichtung der Kriterien

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
Gewichtung	32%	10%	21%	14%	4%	3%	14%	2%

$$r_{ij} = \frac{f_{ij}^* - f_{ij}}{f_{ij}^* - f_{ij}^-} \tag{6.47}$$

Tabelle 6.51: Normierung der Entscheidungsmatrix

F1	0,320	0,100	0,210	0,061	0,035	0,030	0,140	0,007
F2	0,123	0,086	0,122	0,018	0,005	0,020	0,093	0,007
F3	0,271	0,098	0,199	0,122	0,025	0,000	0,047	0,013
F4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,028	0,000	0,093	0,013
F5	0,295	0,055	0,055	0,140	0,040	0,030	0,000	0,020
F6	0,197	0,023	0,155	0,091	0,000	0,010	0,140	0,000
SUMME	1,206	0,363	0,741	0,432	0,133	0,090	0,513	0,060

4. Ermittlung des Nützlichkeitsmaßes der Alternativen in Bezug auf jedes Kriterium

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j * [w_j * \frac{(f_{ij}^+ - f_{ij})}{(f^{+ij} - f_{ij}^-)}] \tag{6.48}$$

5. Ermittlung des Maßes des Bedauerns der Alternativen in Bezug auf jedes Kriterium

$$R_i = \max[w_j * \frac{(f_{ij}^+ - f_{ij})}{(f^{+ij} - f_{ij}^-)}] \tag{6.49}$$

6. Priorisierung der Alternativen durch Berechnung der maximalen Zustimmung

$$Q_i = [V * \frac{(S_i - S^-)}{(S^+ - S^-)}] + [(1 - V) * \frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-}] \tag{6.50}$$

Tabelle 6.52: Lösung des Entscheidungsproblems mittel VIKOR

	S	R			Qi			
F1	0,902	0,320	0,500	0,500	1,00	Rang 1	F1	1,00
F2	0,474	0,123	0,221	0,066	0,29	Rang 2	F3	0,81
F3	0,775	0,271	0,417	0,391	0,81	Rang 3	F5	0,77
F4	0,135	0,093	0,000	0,000	0,00	Rang 4	F6	0,54
F5	0,636	0,295	0,326	0,446	0,77	Rang 5	F2	0,29
F6	0,616	0,197	0,314	0,229	0,54	Rang 6	F4	0,00

6.11.2 Fazit zur Anwendung von VIKOR

Unter vielen beliebten MCDM-Methoden hat VIKOR viel Aufmerksamkeit in der Bewältigung mit komplexen Problemen mit Konfliktfaktoren erregt. VIKOR wird auf Basis der gewählten Einteilung (siehe Abbildung 4.1) den Kompromissmethoden zugeordnet. Die Methode löst Reihungsprobleme auf Basis des geringsten Abstandes zu einer Ideallösung. Bei der Einordnung der Methode VIKOR zu den anderen angewandten MCDM-Methoden im Zuge der Baubranche liegt VIKOR an fünfter Stelle der elf betrachteten Methoden (siehe Abbildung 5.13). In Bezug auf die Anwendung in der Baubranche mit dem Fokus auf nachhaltiges Bauen wurden nach Abschluss der systematischen Literaturrecherche 10 relevante Artikel gefunden. Die geringe Anzahl der recherchierten Artikel deckt sich mit der Literatur [Aghajani-Mir:2016aa]. Benötigte

Elemente zur Anwendung von VIKOR sind Ziele, Kriterien, Kriteriengewichtungen und Alternativen inklusive deren Bewertung für jedes Kriterium. Der Aufwand für den Entscheidungsträger beschränkt sich bei VIKOR auf die Angabe der Kriteriengewichtung. In einem ersten Schritt muss der Entscheidungsträger bewerten, wie wichtig ihm ein Kriterium im Vergleich zu den anderen ist. Dieser Schritt muss für alle Kriterien durchgeführt werden und kann abschließend auf Konsistenz geprüft werden. Ist das Konsistenzmaß nicht zufriedenstellend, müssen mit dem Entscheidungsträger die einzelnen Gegenüberstellungen wiederholt besprochen werden. Durch das Aufzeigen der bevorzugten Mehrheitslösung und das Aufzeigen der Lösung, welche am weitesten vom Ideal entfernt ist, findet diese Methode große Akzeptanz bei der Anwendung für mehrere Entscheidungsträger. Das Hinzufügen von Kriterien setzt eine neue Berechnung aller Schritte voraus. Für den Entscheidungsträger umfasst dabei der Aufwand lediglich das neue Festlegen der Kriteriengewichtung. Nachteile sind das Unberücksichtiglassen von Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Kriterien. Im Detail ist damit gemeint, dass ein Kriterium ein weiteres oder mehrere weitere positiv bzw. negativ beeinflussen kann und es somit durch Schleifen zu anderen Kriteriengewichtungen kommen kann.

Zur Durchführung von VIKOR sind derzeit freie aber auch kommerzielle Softwareprodukte am Markt verfügbar. Ein abschließender, taxativer Überblick über Softwareprodukte wird im Kapitel 7.2 dargestellt.

Tabelle 6.53: Ausgewählte Literatur zur detaillierten Erläuterung einzelner Ablaufschritte der multikriteriellen Entscheidungsmethoden

Multikriterielle Entscheidungsmethode	Abkürzung	Titel	Autor
Analytic Hierarchy Process	AHP	A review of applications of Analytic Hierarchy Process in operations management Entscheidungsunterstützung mit dem AHP	Nachiappan Subramanian & Ramakrishnan Ramanathan Dieter Brinkmeyer & Rolf A. E. Müller
Analytic Network Process	ANP	Rank of green building material criteria based on the three pillars of sustainability using the hybrid multi criteria decision making method ANP model for sustainable Building Energy Efficiency Retrofit (BEEER) using Energy Performance Contracting (EPC) for hotel buildings in China	Seyed Weysam Khoshnava et al. Pengpeng Xu & Edwin H.W. Chan
Complex proportional assessment	COPRAS	Sustainable Development of Rural Areas' Building Structures Based on Local Climate An Integrated Multi-Criteria-Decision-Making Tool for Mechanical Designer Selection	Sartaraz Hashemkhani Zolfani & Edmundas Kazimieras Zavadskas Gül Polat et al.
Elimination et choix traduisant la réalité	ELECTRE	ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications Multi-Criteria Decision Making Using ELECTRE	Kannan Govindan & Martin Brandt Jeppsen Sahaaya Arul Mary S. A. & Suganya Ganesan
Multiplicative exponential weighting	MEW	Multi-criteria analysis of Projects' performance in construction Considerations regarding the choice of ranking multiple criteria decision making methods	Edmundas Kazimieras Zavadskas et al. Alexandre Bevilacqua Leonati
Preference ranking organization method for enrichment of evaluations	PROMETHEE	PROMETHEE Methods Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung	Jean-Pierre Brans & Bertrand Mareschal Jutta Geldermann & Nils Lerche
Simple Additive Weighting	SAW	Simple Additive Weighting approach to Personnel Selection problem Simple Additive Weighting to Diagnose Rabbit Disease	Alireza Aishari et al. Ramadiani, Dyrna Marissa et al.
Superiority and Inferiority Ranking	SIR	A superiority and inferiority ranking model for contractor selection Reliability-based decision making for selection of ready-mix concrete supply using stochastic superiority and inferiority ranking method	Mohamed M. Marzouk Jui-Sheng Chou & Citra Satira Ongkowlitoyo
Technique for order of preference by similarity to ideal solution	TOPSIS	A bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques Multi-criteria decision making models by applying the TOPSIS method to crisp and internal data	Shaher H. Zyoud & Daniela Fuchs-Hanusch Ewa Roszkowska
Utilities additives	UTA	UTA Methods Decision making for material selection using the UTA method	Yannis Siskos et al. Vijay Manikrao Athawale et al.
Visekriterijunska Optimizacija Kompromisno rešenje	VIKOR	A state of the art literature review of VIKOR and its fuzzy extensions on applications Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use	Muhammet Gül et al. Nikola Tosi et al.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im abschließenden Kapitel der Arbeit werden die grundlegenden Erkenntnisse zusammengefasst sowie auf zukünftige relevante Forschungsfragen eingegangen.

7.1 Zusammenfassung

Die Anwendung von multikriteriellen Entscheidungsmethoden hält auch in der Baubranche Einzug. Die durchgeführte Literaturrecherche hat ergeben, dass zahlreiche Methoden bereits für die Lösung von Entscheidungsproblemen in der Bauindustrie angewandt wurden. Abhängig von der Einfachheit in der Anwendung, von der Dauer des Bestehens der Methoden und von der Art der zu lösenden Entscheidungsprobleme sind manche Methoden häufiger anzutreffen als andere. In Tabelle 7.1 ist ein allgemeiner Überblick über die Eigenschaften der jeweiligen Methoden dargestellt.

Durch die getroffenen Abgrenzungen wurden in dieser Arbeit Multi Attribute Decision Making-Methoden (MADM) untersucht. Multi Objective Decision Making-Methoden (MODM) - Methoden, welche mehrere Ziele verfolgen - wurden nicht berücksichtigt. Dabei wurden ausgewählte Methoden betrachtet und wie in Abbildung 4.1 dargestellt eingeteilt. Die Unterteilung, welche sich auch durch zahlreiche Literaturwerke belegen lässt, erfolgte in vier Kategorien:

- wertbasierte Methoden (utility based methods)
- ausschließende Methoden (outranking methods)
- kompromissbasierte Methoden (compromise methods) und
- sonstige Methoden (other methods)

Wie aus der systematischen Literaturrecherche hervorgeht (vgl. Abbildung 5.13) wird die Methode AHP (eine wertbasierte Methode) im Zuge der Baubranche am häufigsten angewandt. Gefolgt von TOPSIS (eine kompromissbasierte Methode) und ANP (wieder eine wertbasierte Me-

Tabelle 7.1: Übersicht Methoden und deren Eigenschaften

Zuordnung der Methode	AHP	ANP	COPRAS	ELECTRE	MEW	PROMETHEE	SAW	SIR	TOPSIS	UTA	VIKOR
	Utility-based techniques	Utility-based techniques	Compromise method	Outranking method	Utility-based techniques	Outranking method	Utility-based techniques	Utility-based techniques	Compromise method	Utility-based techniques	Compromise method
Anwendung in der Baubranche	a	a	a	b	d	b	b	c	a	c	b
Aufwand der Erweiterbarkeit	3	4	2	3	1	3	1	3	2	4	2
Entscheidungsträgerfreundlichkeit	IV	IV	I	I	I	III	I	II	I	III	I
Analystenfreundlichkeit	III	IV	II	III	I	III	I	IV	II	IV	II
Berücksichtigung von Wechselwirkungen	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
				ELECTRE II		PROMETHEE I				UTASTAR	
				ELECTRE III		PROMETHEE II					
				ELECTRE IV							
				ELECTRE TRI							
				ELECTRE IV							
				ELECTRE IS							
Weitere Methoden der Familie											
					1	einfach			I	sehr anwenderfreundlich	
	a	sehr hohe Anwendung			2	moderat			II	anwenderfreundlich	
	b	hohe Anwendung			3	aufwendig			III	wenig anwenderfreundlich	
	c	geringe Anwendung			4	sehr aufwendig			IV	nicht anwenderfreundlich	
	d	keine Anwendung									
Legende											

thode). An vierter Stelle der betrachteten Methoden reiht sich eine ausschließende (outranking) Methode ELECTRE ein.

Betreffend der Anwenderfreundlichkeit der einzelnen Methoden wurde in die Anwenderfreundlichkeit für Entscheidungsträger und die Anwenderfreundlichkeit für Analysten unterschieden. Bei der Anwenderfreundlichkeit für Entscheidungsträger wurde darauf geachtet, welche Inputs vom Entscheidungsträger notwendig sind und wie umfangreich die Erhebung der benötigten Informationen ist. Dabei spielt die Angabe der Kriteriengewichtung eine maßgebende Rolle. Vor allem die Anwendung von paarweisen Vergleichen, wie diese bei AHP und ANP angewandt wurden, stellen den Entscheidungsträger vor eine große Herausforderung. Verlängert wird dieser Prozess häufig dadurch, dass nach der durchgeführten Konsistenzprüfung, die Konsistenz der Angaben des Entscheidungsträgers nicht gegeben ist. Diese Situation erfordert erneute Gespräche zwischen Entscheidungsträger und Analysten, um eine konsistente Kriteriengewichtung (z.B. konsistente Bewertungen der paarweisen Vergleiche) zur erhalten. Neben paarweisen Vergleichen werden Entscheidungsträger auch bei der Angabe von Präferenzfunktionen vor eine schwierige Aufgabe gestellt. Dabei geht es darum für jedes Kriterium die Indifferenz- und Präferenzbereiche anzugeben. Dies bedeutet, dass der Entscheidungsträger Bandbreiten für seine Präferenzen angeben muss, in welchen für ihn das Kriterium noch als erfüllt gilt bzw. untere Schwellenwerte angeben muss, bis zu welchem die Präferenz nicht erfüllt wird und Indifferenz herrscht. Diese Präferenzfunktionsangabe wird bei Methoden wie PROMETHEE und SIR notwendig. Neben dieser Angabe können aber auch vordefinierte Rankings erforderlich sein. Diese vordefinierten Rankings sind z.B. bei der Methode UTA erforderlich. Die Dauer und der Aufwand der Ermittlung dieses vordefinierten Rankings hängt durchaus mit den Fähigkeiten des Analysten zusammen. Erfahrene Analysten wenden Methoden (z.B. white cards) an, um den Entscheidungsträger bei der Reihung bestmöglich zu unterstützen. Für den Entscheidungsträger am unaufwendigsten sind Methoden (COPRAS, ELECTRE, MEW, SAW, TOPSIS oder VIKOR) bei welchen lediglich eine Kriteriengewichtung in Form einer Prozentzahl angegeben werden muss, wobei auch diese Angaben nicht für alle Entscheidungsträger einfach sind. Auch hier ist die gezielte Fragestellung der Analysten wichtig, um die Entscheidungsträger zu unterstützen. Die Anwenderfreundlichkeit für Analysten wurde auf Basis der notwendigen mathematischen Operatoren (notwendigen Berechnungsschritte) bewertet. Hier sind vor allem die Methoden MEW und SAW an erster Stelle zu reihen. Bei beiden Methoden werden die Leistungswerte der Entscheidungsmatrix normiert und anschließend ein Mittelwert gebildet, welcher die Alternativen reiht. Bei SAW wird die Normierung additiv und bei MEW exponentiell durchgeführt. Auch relativ rasch durchführbare Methoden stellen Methoden dar, bei welchem maximale und minimale Leistungswerte verwendet werden bzw. in weiterer Folge Abstände einzelner Alternativen zu diesen Maximal- und Minimalwerten berechnet werden. Dazu zählen COPRAS, TOPSIS und

VIKOR. Bei allen anderen berücksichtigten Methoden müssen einige mehr Berechnungsschritte durchgeführt werden. Genannt soll hier auch noch ANP und UTA werden, welche ohne Softwareunterstützung nur durch enormen Aufwand berechnet werden können.

Ein wichtiger Punkt - vor allem in Bezug auf die Anwendung in der frühen Planungsphase von Gebäuden - stellt die Berücksichtigung von Wechselwirkungen dar. Positive und negative Rückkopplungen zwischen Kriterien werden lediglich bei der Methode ANP berücksichtigt.

Auf Basis des Anwendungsbeispiel wurden die Methoden getestet, um zum einen die Ergebnisse zu vergleichen und zum anderen die Anwendung in der frühen Planungsphase von Gebäuden zu analysieren. In Tabelle 7.2 sind die Methoden und das berechnete Ranking der unterschiedlichen Gebäudehüllen (F1-F6) aus dem Anwendungsbeispiel abgebildet.

Tabelle 7.2: Gegenüberstellung der Reihungen

	AHP	ANP	COPRAS	ELECTRE	MEW	PROMETHEE	SAW	SIR	TOPSIS	UTA	VIKOR
Rang 1	F1	F1	F1	F1	F1	F1	F3	F1	F1	F1	F1
Rang 2	F5	F3	F3	F3	F3	F3	F5	F3	F3	F3	F3
Rang 3	F3	F2	F6	F5	F6	F5	F1	F6	F6	F6	F5
Rang 4	F6	F5	F5	F6	F5	F6	F6	F5	F5	F5	F6
Rang 5	F2	F6	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2	F2
Rang 6	F4	F4	F4	F4	F4	F4	F4	F4	F4	F4	F4

Es ist ersichtlich, dass nicht alle multikriteriellen Entscheidungsmethoden dasselbe Ergebnis liefern. Gleiche Reihungen ergeben sich zum Beispiel mit den Methoden COPRAS, MEW, SIR, TOPSIS und UTA bzw. mit den Methoden ELECTRE, PROMETHEE und VIKOR. Nicht überraschend ist, dass bei allen Methoden die Alternative F4 an letzter Stelle liegt, da dieses Gebäudehüllenszenario (welches bei beinahe allen Kriterien am schlechtesten abschneidet) bewusst gewählt wurde.

In Abbildung 7.1 wurde zu visueller Darstellung eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt, um die Abweichungen der einzelnen Ränge darzustellen.

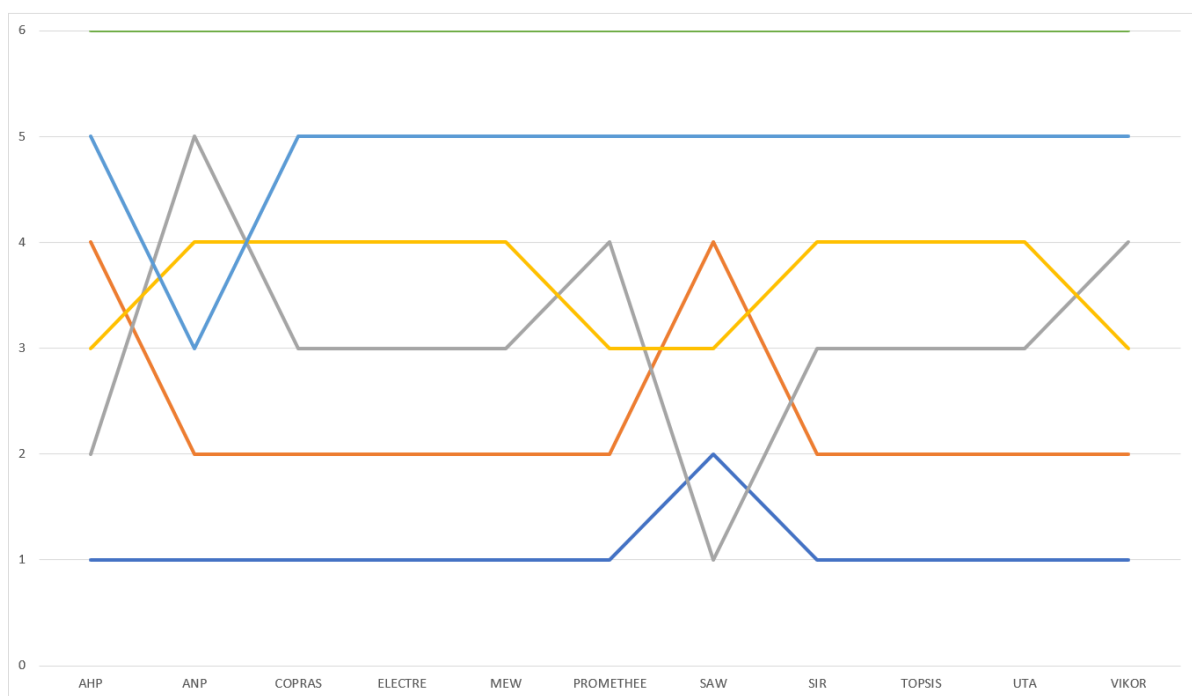


Abbildung 7.1: Unsicherheitsanalyse der Ergebnisse - Grafische Gegenüberstellung der Reihungen

Das Alternative F4 die Gebäudehülle darstellt, welche die Präferenzen des Entscheidungsträgers am wenigsten befriedigt kann als sicheres Ergebnis angesehen werden. Die grüne Linie (F4) hat keine Sprünge und ist somit bei keiner Methode auf einem besseren Rang als Rang 6 gereiht. Durchaus sicher können auch noch Alternative F2 (hellblaue Linie) und Alternative F1 (dunkelblaue Linie) angesehen werden. Bei diesen beiden Gebäudehüllen gibt es jeweils nur bei einer multikriteriellen Entscheidungsmethode einen Rangwechsel.

Zur Durchführung der zuvor dargestellten Berechnungen sind für die einzelnen Methoden teilweise andere Inputparameter notwendig. Die notwendigen Inputparameter und grundlegenden mathematischen Operationen der jeweiligen Methoden werden in Tabelle 7.3 dargestellt.

Tabelle 7.3: Gegenüberstellung Methoden

	AHP	ANP	COPRAS	ELECTRE	MEW	PROMETHEE	SAW	SIR	TOPSIS	UTA	VIKOR
Ziel	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Kriterien	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Alternativen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Einfache Kriteriengewichtung			x	x	x	x	x	x	x		x
Kriteriengewichtung durch paarweise Vergleiche	x	x									
Alternativengewichtung durch paarweise Vergleiche	x	x				x					
Vordefinierte Reihung										x	
Präferenzfunktionen						x		x			

Alle berücksichtigten Methoden (MADM-Methoden) benötigen ein Ziel. Das bedeutet, dass das übergeordnete Ziele „Nachhaltige Gebäudehülle“ durch individuelle Kriterien definiert wird. Im Allgemeinen werden dann bei MADM-Methoden die Kriterien in Nutzwerte umgerechnet. Zum Beispiel könnte K1 (bei dem Überschreiten eines festgelegten Leistungswert) gegenüber K2 für den Entscheidungsträger einen größeren Nutzen aufweisen. K2 könnte zum Beispiel beim Unterschreiten eines festgelegten Leistungswert keinen Nutzen für den Entscheidungsträger haben. Durch die Interpolationen zwischen den festgelegten Nutzwerten aller Kriterien können Nutz- bzw. Wertfunktionen berechnet werden. Danach kann die Gewichtung der Kriterien miteinbezogen werden. Wenn zum Beispiel K1 die dreifache Wichtigkeit von K2 hätte würde die Gewichtung wie folgt aussehen:

$$3xK1 + K2 = \text{Gesamtnutzen} \quad (7.1)$$

Schlussendlich entscheidet sich der Entscheidungsträger für die Gebäudehülle mit dem größten Nutzen.

Bei MODM-Methoden können durchaus die gleichen Ergebnisse erzielt werden, obwohl der Ansatz ein wenig abweichend ist. Auch hier werden die Kriterien zu Nutzwerten umgerechnet und interpoliert. Mit dieser Erkenntnis können dann die optimalen Leistungswerte für K1 und K2 abgeleitet werden. Schlussendlich wird der Planer damit beauftragt eine Fassade mit diesen Leistungswerten zu planen.

Nachsatz: Mit MADM-Methoden erhält man eine Gebäudehülle, welche den Anforderungen entspricht und mit MODM-Methoden weiß man, welche Gebäudehülle den Anforderungen entspricht.

Zur Lösung von Entscheidungsproblemen mittels multikriteriellen Entscheidungsmethoden ist eine vollständige Entscheidungsmatrix notwendig. Eine Entscheidungsmatrix besteht aus Alternativen, den Kriterien nach welchen die Alternativen bewertet werden sollen und schlussendlich auch aus den Werten (in der vorliegenden Arbeit als Leistungswerte bezeichnet) jedes Kriteriums für jede Alternative.

Neben der Entscheidungsmatrix ist in den meisten Fällen auch eine Kriteriengewichtung notwendig. Das bedeutet, dass sich der Entscheidungsträger seiner Präferenzen der Kriterien bewusst sein muss. Dies ist einer der zeitaufwendigsten Schritte im Zuge der Anwendung von multi-

kriteriellen Entscheidungsmethoden, da oftmals zahlreiche Gespräche zwischen Analyst und Entscheidungsträger geführt werden müssen, um die Wichtigkeit der Kriterien zu identifizieren.

Bei der Anwendung der berücksichtigten Methoden wurde bei der Methode AHP die Skala nach *Saaty* angewandt. Das Ergebnis dieser Kriteriengewichtung wurde in weitere Folge bei allen Methoden angenommen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. In Fällen, in welchen der Entscheidungsträger die Präferenzen nicht festlegen kann, gibt es multikriterielle Entscheidungsmethoden, welche genau auf dieses Problem ausgelegt sind. Beispielhaft sei hier die Methode UTA genannt, welche durch ein vordefiniertes Ranking der Alternativen die Wichtigkeit der Kriterien bestimmen kann. In dieser Arbeit wurde, wiederum für die bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse, bei der Methode UTA dieselbe Kriteriengewichtung hinterlegt, wie bei den restlichen betrachteten Methoden.

Weitere Inputs, welche je nach Methode notwendig sein können sind die Angabe einer Alternativengewichtung, der Angabe eines vordefinierten Rankings oder die Angabe von Präferenzfunktionen für jedes Kriterium.

Neben der Anwendung von Softwaretools ist für professionelle Analysten auch die Anwendung von Excel-Tabellen eine gängige Lösung. Der Vorteil dabei ist, dass durch den Gewinn an Erfahrung das entwickelte Arbeitsblatt permanent angepasst und verbessert werden kann. Detaillierte Beschreibungen von MCDM-Softwaretool finden sich zum Beispiel in [**Greco2016**], [**Danesh:2017aa**].

7.2 Beantwortung der Forschungsfragen und Verifizieren der Hypothese

In diesem Abschnitt werden die eingangs gestellten Forschungsfragen beantwortet und die aufgestellten Hypothesen verifiziert bzw. falsifiziert.

Forschungsfrage 1: Was ist der Stand der Forschung in Bezug auf multikriterielle Entscheidungsmethoden in der Baubranche?

Mittels der durchgeführten systematischen Literaturrecherche unter dem Einbeziehen relevanter Keywords wurden zahlreiche multikriterielle Entscheidungsmethoden untersucht. In einem ersten

Schritt stützte sich die vorliegende Arbeit auf eine Publikation (Review-Paper) von *Jato-Espino [Jato2014]*. Bei der Einteilung der Methoden wurde aus Sicht des Autors festgestellt, dass nicht alle adressierten Methoden auch den multikriteriellen Entscheidungsmethoden zugeordnet werden sollten. Diese Auffassungsunterschiede in der Einteilung der Methoden, welche auch durch verschiedenste Literatur untermauert werden kann, ergab einen ersten Ausschluss von Methoden. Ein zweites Ausschlusskriterium war, dass im Zuge der vorliegenden Arbeit keine mehrzieligen Methoden (multi-objective decision making methods) berücksichtigt werden sollten. Die Auswertung der systematischen Literaturrecherche ergab, dass die erste Forschungsfrage mit ja beantwortet werden kann. In den letzten Jahrzehnten gab es ein Wachstum von multikriteriellen Entscheidungsmethoden im Bereich der Baubranche. Die ansteigenden Trends an Publikationen sind im Kapitel 5 für die berücksichtigten Methoden dargestellt.

Forschungsfrage 2: Für welche Bereiche in der Baubranche werden multikriterielle Entscheidungsmethoden bereits angewendet?

Im Zuge der Literaturrecherche wurden zahlreiche Artikel gefunden, welche MCDM-Methoden in unterschiedlichen Themenfeldern der Baubranche einsetzen. Ein häufig anzutreffendes Themenfeld ist dabei die Auswahl von Baumaterialien. Auch bei der Auswahl von Baumaschinen werden bereits multikriterielle Entscheidungsmethoden eingesetzt. Dabei wurden MCDM-Methoden zur Auswahl von Aushubmaschinen, von Kränen oder von Betonpumpen angewandt.

Ein weiteres Einsatzgebiet von MCDM – Methoden sind die Themenbereiche Transport und Logistik. Dabei wurden umweltbezogene Themenbereiche wie Abfallmanagement, Energiemanagement, Abwasserbehandlung, Wasserqualität oder Luftqualität mittels MCDM-Methoden gelöst. Vor allem im Bereich des Energiesektors wurde der Einsatz von MCDM – Methoden von zahlreichen Autoren analysiert.

Auch im Zusammenhang mit der Methode der Ökobilanz werden MCDM-Methoden angewandt. Nach der Ökobilanzierung besteht eine weitere Herausforderung für Umweltmanager, aus den zahlreichen ökologischen bewerteten Indikatoren ein umfassendes Urteil über die Umweltleistung zu erstellen. Diese Herausforderung kann mit multikriteriellen Entscheidungsmethoden angegangen werden, die konzeptuell in das Ökobilanz-Framework und Standards als „Gewichtung“ eingeführt werden. Eine Nachhaltigkeitsbewertung mittels MCDM-Methoden wurde auch mittels eines Indikatorensystems mit sechs sozio-ökonomische und ökologische Indikatoren durchgeführt.

Im Zusammenhang mit der Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden haben Studien gezeigt, dass Architekten und Bauingenieure aufgrund mehrerer Unsicherheiten im Auswahlprozess große Schwierigkeiten haben, die in Neubauprojekten zu implementierenden Zertifizierungspunkte auszuwählen. Die Anwendung von MCDM-Methoden wurde dahingehen in zwei realen Fallstudien getestet. Auch die Anwendung in der frühen Planungsphase von Bauvorhaben wird in einigen Arbeiten erläutert. Baumanagemententscheidungen beinhalten typischerweise mehrere widersprüchliche Aspekte, die berücksichtigt werden müssen. Diese Entscheidungssituationen können als multikriterielle Optimierungsprobleme formuliert werden, bei denen die verschiedenen Aspekte eines Bauprojekts die gleichzeitig optimierten widersprüchlichen Kriterien darstellen. Daher kann die Anwendung einer multikriteriellen Optimierung in dieser frühen Phase zu erheblichen Einsparungen beim Bauvorhaben führen.

Zusammengefasst sollte die Forschungsfrage in die Teile Theorie und Praxis unterteilt werden. Die Anwendung von MCDM – Methoden in der Baubranche wird bereits für zahlreiche Themenbereiche des Bauingenieurwesens in der Theorie erforscht. In der Praxis steht eine tatsächliche und vor allem regelmäßige Anwendung jedoch noch aus.

Forschungsfrage 3: Ändert sich das Ergebnis bei der Anwendung unterschiedlicher multikriterieller Entscheidungsmethoden für das gleiche Entscheidungsproblem?

Die Lösung des Entscheidungsproblems ändert sich mit der angewandten Methoden. In Abbildung 7.1 werden die Ergebnisse der betrachteten Methoden graphisch und in Tabelle 7.2 tabellarisch gegenübergestellt.

Diese Erkenntnis deckt sich mit einigen Artikel [Zanakis1998], [Gershon1983], welche diese Problematik bereits adressiert haben. Nach Voogd treten in mindestens 40 % von Anwendungsprobleme unterschiedliche Ergebnisse mit unterschiedlichen Methoden auf [Voogd1983]. Die Unterschiede im Ergebnis sind auf folgenden Punkte zurückzuführen:

Diese Inkonsistenz kann auf folgende Punkte zurückgeführt:

- Unterschiedliche Anwendung von Gewichtungen in den Berechnungen
- Unterschiedliche Algorithmen bei der Wahl der besten Lösung
- Algorithmen versuchen Ziele zu skalieren, was die gewählte Gewichtung der Kriterien beeinflusst

- Einige Algorithmen führen zusätzliche Parameter ein, welche die Wahl der besten Lösung beeinflussen

Forschungsfrage 4: Sind freizugängliche Softwaretools (Freeware) für die betrachteten multikriteriellen Entscheidungsmethoden verfügbar?

Der steigende Trend von der Entwicklung von MCDM-Methoden spiegelt sich auch in der Entwicklung der Softwaretools wider. Beinahe für alle berücksichtigten Methoden sind Softwaretools vorhanden. Der Anteil der Softwaretool teilt sich gleichmäßig auf frei erhältliche und kommerzielle Tools auf.

In Tabelle 7.4 und 7.5 wird ein grober Überblick über freie und kommerzielle erhältliche Softwaretools dargestellt.

Die dargestellten Tabellen stellen nur einen Überblick über Softwaretools dar und bilden keine vollständige Liste ab, da der Fokus der vorliegenden Masterarbeit nicht auf die Recherche der Softwaretools ausgelegt war.

7.2 Beantwortung der Forschungsfragen und Verifizieren der Hypothese

Tabelle 7.4: Softwarelösungen für die ausgewählten MCDM Methoden

AHP			
Name	Source	Version	
123ahp	http://www.123ahp.com/	Freeware	
Ahp Software	https://sourceforge.net/projects/ahp-software/	Freeware	
Analytic Hierarchical Process.NET	http://www.kniaz.net/software/AHP.aspx	Freeware	
Criterion DecisionPlus	https://en.wikipedia.org/wiki/Criterion_DecisionPlus	Commercial	
Decision Lens	https://www.decisionlens.com/	Commercial	
DEFINITE 3.1	https://spinlab.vu.nl/support/tools/definite-bosda/	Freeware	
EXPERT CHOICE	https://www.expertchoice.com/ahp-software	Commercial	
MakeItRational	http://makeitrational.com/analytic-hierarchy-process/ahp-software	Commercial	
Priority Estimation Tool (AHP)	https://sourceforge.net/projects/priority/	Freeware	
Qualica	https://www.qualica.net/qps_ahp.html	Commercial	
SuperDecisions	https://www.superdecisions.com/	Freeware	
Transparent Choice	https://www.transparentchoice.com/ahp-software	Commercial	
True North Software	http://www.truenorthsoftware.com/downloads/	Commercial	
XLSTAT	https://www.xlstat.com/de/loesungen/eigenschaften/analytic-hierarchy-process	Commercial	

ANP			
Name	Source	Version	
ANP Solver	kkir.simor.ntua.gr/anpsolver.html	Freeware	
Decision Lens	https://www.decisionlens.com/	Commercial	
SuperDecisions	https://www.superdecisions.com/	Freeware	

COPRAS			
Name	Source	Version	

ELECTRE			
Name	Source	Version	
swmath	https://www.swmath.org/software/16173	Commercial	
XLSTAT	https://www.xlstat.com/de/loesungen/eigenschaften/analytic-hierarchy-process	Commercial	
DEFINITE 3.1	https://spinlab.vu.nl/support/tools/definite-bosda/	Freeware	
Diviz	diviz.org	Freeware	
J-Electre	https://github.com/Valdecy/J-Electre	Freeware	
qgis-etri	https://github.com/oso/qgis-etri	Freeware	

MEW			
Name	Source	Version	
	keine spezielle Software vorhanden - einfache mathematische Operationen		

PROMETHEE			
Name	Source	Version	
Gaia	http://www.promethee-gaia.net/software.html	Freeware?	
swmath	https://www.swmath.org/software/16173	Commercial	
D-Sight	http://www.d-sight.com/		
	https://www.uni-goettingen.de/de/document/download/	Freeware	
	http://www.mamca.be/en/	Commercial	

Tabelle 7.5: Softwarelösungen für die ausgewählten MCDM Methoden

SAW		
Name	Source	Version
keine spezielle Software vorhanden - einfache mathematische Operationen		

SIR		
Name	Source	Version

TOPSIS		
Name	Source	Version
Decision radar	http://decision-radar.com	Freeware
Fuzzy Decision	http://fuzzydecision.com/en/Product/Info/2/Topsis	Commercial
R	https://cran.r-project.org/web/packages/topsis/index.html	Freeware
SANNA	http://nb.vse.cz/~jablon/sanna.htm	Freeware
TOPSIS	http://www.stat-design.com/Software/TOPSIS.php	Commercial
TOPSIS 3.10	https://topsis.software.informer.com/	Commercial
Topsis by Statistical Design Institute	https://en.freownloadmanager.org/Windows-PC/Topsis.html	Commercial
TOPSIS Software	http://www.onlineoutput.com/topsis-software/	Freeware

UTA		
Name	Source	Version
Diviz	diviz.org	Freeware
Pfrefdis	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054899001185	
Utaplus	https://www.swmath.org/software/16225	Commercial
VisualUTA	http://idss.cs.put.poznan.pl/site/visualuta.html	Freeware

VIKOR		
Name	Source	Version
Github	https://github.com/cran/FuzzyMCDM	Freeware
Matlab	https://sanaye20.ir/product/fuzzyvikor-matlab	Commercial
R	https://cran.r-project.org/web/packages/FuzzyMCDM/index.html	Freeware
swmath	https://www.swmath.org/software/3253	Commercial

Die Verifizierung der eingangs festgelegten Hypothese wird nach den gewonnenen Erkenntnissen wie folgt dargestellt.

Hypothese: Multikriterielle Entscheidungsmethoden werden in der Baubranche bereits angewendet und können auch in der Projektphase der frühen Planungsphase von Gebäuden die Entscheidungsträger bei der Berücksichtigung von steigenden Anforderungen unterstützen. Dabei spielt es für die Lösung des Entscheidungsproblems keine Rolle welche, der in den letzten Jahrzehnten entwickelten unterschiedlichen, multikriterielle Entscheidungsmethode eingesetzt wird und die Anwendung kann durch verfügbare Softwaretools erleichtert werden.

MCDM-Methoden werden bereits in der Baubranche angewendet. Wie aus der systematischen Literaturrecherche hervorgegangen ist, gibt es einen Anstieg in den letzten 18 Jahren bei jeder der berücksichtigten MCDM-Methoden in der Anwendung in der Baubranche. Aus den zahlreichen Themenfeldern in welchen MCDM-Methoden bereits angewendet wurden, findet sich jedoch wenig über die Anwendung in der frühen Planungsphase von Gebäuden. Alle multikriteriellen Entscheidungsmethoden setzen eine vollständige Entscheidungsmatrix voraus. Das bedeutet, dass neben der Zielformulierung, vor allem eine endliche Anzahl an Alternativen festgelegt werden muss. Neben den Alternativen werden auch Kriterien und bei vielen Methoden deren Kriteriengewichte benötigt. Nach dem Definieren dieser erforderlichen Elemente müssen die Leistungswerte ermittelt werden. Bei der Ermittlung der Leistungswerte unterscheiden sich die Methoden und es können qualitative, quantitative oder mit Unsicherheiten behaftete Leistungswerte angegeben werden. Bei diesem Punkt gestaltet sich, aus Sicht des Autors, die Anwendung von MCDM-Methoden in der frühen Planungsphase von Gebäuden schwierig. Grund dafür sind die zahlreichen zu berücksichtigenden Kriterien und die Angabe von Leistungswerten für jede vorhandene Alternative. Dies setzt wiederum voraus, dass die Alternativen bekannt sind, was im frühen Planungsprozess oftmals nicht der Fall ist. Den Planern ist es nicht zumutbar die zahlreichen benötigten Informationen im Zuge der frühen Planungsphase anzugeben. Neben dem großen Aufwand sind viele dieser Leistungswerte in einer frühen Planungsphase auch noch nicht bekannt. In einer adaptierten Form (siehe Ausblick und weitere Forschungsfragen) ist die Anwendung aller betrachteten MCDM-Methoden in der frühen Planungsphase durchaus denkbar und mit einem Mehrwert für alle beteiligten Personen an einem Bauvorhaben behaftet.

Für einzelne Fälle im späteren Verlauf des Planungsprozesses können MCDM-Methoden angewendet werden. Beispielhaft seien hier die Auswahl von Materialien oder Haustechnikanlagen genannt. Fokus dieser Arbeit ist jedoch die Entscheidungsunterstützung im frühen Planungspro-

zess, in welchem noch kaum Informationen zum späteren Gebäude vorliegen. In dieser Phase kann die alleinige Anwendung von MCDM-Methoden den Planer nicht ausreichend in seiner Tätigkeit unterstützen.

Speziell für die Umsetzung von Nachhaltigen Bauen bieten MCDM-Methoden ohne zusätzliche Erweiterung aus Sicht des Autors keinen erheblichen Mehrwert für Planer. Wie bereits erwähnt können MCDM-Methoden für einzelne Teilbereiche - Auswahl von nachhaltigen Materialien, Auswahl von nachhaltigen Energiesystemen - herangezogen werden.

Für eine realitätsnahe Abbildung der Planungspraxis sollten Wechselwirkungen von Kriterien einbezogen werden. Demnach ist die Anwendung des Analytic Network Processes nicht in Bezug auf die Umsetzung nachhaltigen Bauens die bevorzugte Methode, sondern aus dem Grund der realitätsnahen Abbildung. Für eine Umsetzung nachhaltigen Bauens in der frühen Planungsphase von Gebäuden sollte das Konzept von multikriteriellen Entscheidungsmethoden in ein ganzheitliches Prozessmodell eingeordnet werden. Wie dieses Prozessmodell konzipiert sein könnte, folgt im letzten Abschnitt dieser Arbeit.

7.3 Ausblick und zukünftige Forschungsfragen

Im letzten Teil dieser Masterarbeit soll vor allem die Erkenntnis adressiert werden, dass MCDM-Methoden in alleiniger Anwendung nicht für frühe Planungsphasen von Gebäuden geeignet sind. Die Gründe wurden bereits angesprochen und liegen im erheblichen Zeitaufwand für die Erstellung der Entscheidungsmatrix sowie die Schwierigkeiten bei nicht vorhandenen Leistungswerten von Alternativen für Kriterien. Wie im vorgeschlagenen Prozessmodell erläutert, ist die Verknüpfung mit Benchmarks bzw. mit Werten aus einschlägigen Datenbanken eine Möglichkeit die Erarbeitung der vollständigen Entscheidungsmatrix zu erleichtern und somit MCDM-Methoden in der frühen Planungsphase zumindest als Grobabschätzungen - z.B. für die Auswahl von Materialien - anzuwenden.

7.3.1 Ausblick

Eine zukünftige Anwendung von multikriteriellen Entscheidungsmethoden muss daher diese beiden Aspekte adressieren und versuchen diese in einem Prozessmodell zu lösen und zu implementieren.

Das ganzheitliche Prozessmodell muss, aus Sicht des Autors, folgende Punkte abdecken:

- Erfassung von Entscheidungsträgerpräferenzen für die Gebäudeperformance
- Automatisierte Umlegungen der Entscheidungsträgerpräferenzen auf die einzelnen Bauteile des Gebäudes
- Zur Verfügung stellen von notwendigen Bauteilinformationen in Form von Datenbanken
- Automatisierte Erstellung der Entscheidungsmatrix mit datenbankbasierten Informationen von Bauteilen, Kriterien und Kriteriengewichtungen
- Berechnung der Rangfolge aller Bauteile durch die Anwendung einer MCDM-Methode
- Graphische Aufbereitung der Ergebnisse für den Planer

Ein erstes Konzept wie ein datenbankbasiertes, systemisches und multikriterielles Prozessmodell aussehen könnte, ist in Abbildung 7.2 dargestellt.

Schritt 1: Entscheidungsträgerpräferenzen

Der erste Schritt des Prozessmodells muss die Erfassung der Präferenzen der Entscheidungsträger umfassen. In Bezug auf Nachhaltiges Bauen können an dieser Stelle Gebäudezertifizierungssysteme und deren Kriterien als Grundlage dienen. Im Zuge von Gesprächen mit dem Entscheidungsträger muss identifiziert werden, wie wichtig die einzelnen Kriterien für diesen sind. Ist der Erhalt eines Gebäudezertifikats ein vorgegebenes Ziel, können bereits an dieser Stelle die wichtigsten Kriterien mit dem Entscheidungsträger diskutiert werden.

Schritt 2: Umlegung der Kriteriengewichtungen

Da nicht alle Kriterien eines Gebäudezertifizierungssystems auf alle Bauteile gleichermaßen zutreffen, bedarf es einer automatisierten Umlegung der festgelegten Präferenzen der Entscheidungsträger auf die Bauteile.

Schritt 3: Erforderliche Bauteilinformationen

Auf Basis der Kriterien eines jeden Bauteils muss es für die Anwendung des Prozessmodells verpflichtende Bauteildatenbanken mit den notwendigen Informationen geben. Diese Bauteilinformationen können mit den derzeitigen Produktdatenblättern -in erweiterter Form - verglichen werden.

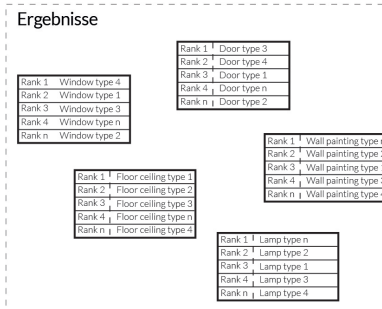
SCHRITT 6:
Entscheidungsunterstützung in der
frühen Planungsphase von Gebäuden

E Planung des Gebäudes

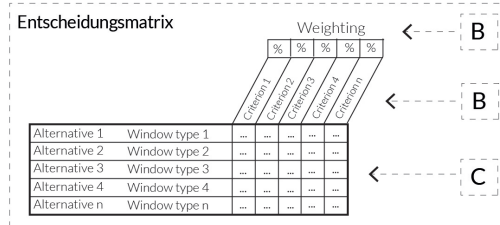


SCHRITT 5:
Anwendung multikriterieller
Entscheidungsmethoden

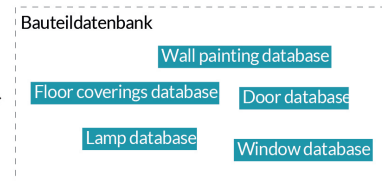
D MCDM



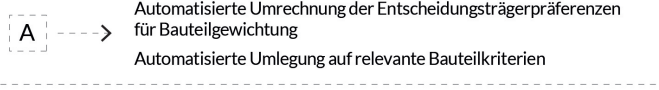
SCHRITT 4:
Erstellung der Entscheidungsmatrix



SCHRITT 3:
Erforderliche Bauteilinformationen



SCHRITT 2:
Transfer der ganzheitlichen Entscheidungs-
trägerpräferenzen auf einzelne Bauteile



SCHRITT 1:
Erfassung der Entscheidungsträger-
präferenzen



BASIS DES PROZESSMODELLS:
Gebäudezertifizierungssystem

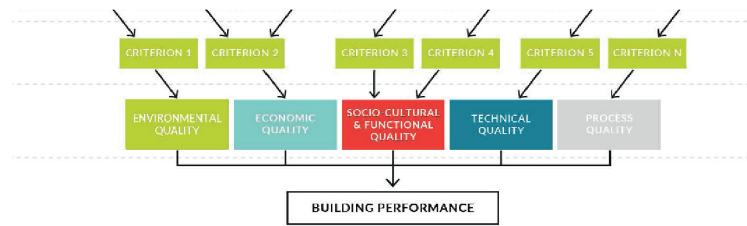


Abbildung 7.2: Zukunftsfähiges datenbankbasiertes, systemisches und multikriterielles Prozessmodell

Schritt 4: Erstellung der Entscheidungsmatrix

Der Zeitaufwand zur Erstellung der Entscheidungsmatrix kann mit Hilfe von Verknüpfungen und automatisierten Berechnungen innerhalb des Prozessmodells erfolgen. In der heutigen Zeit, in welcher Intelligente Systeme, Künstliche Intelligenz oder Big Data in aller Munde sind, ist das automatisierte Berechnen von vorgegeben Methoden kein Hindernis. Voraussetzungen für automatisierte Berechnungen sind viel mehr das zur Verfügung stellen der notwendigen Parameter im Zuge von Datenbanken.

Schritt 5: Multikriterielle Entscheidungsmethode

Nach erfolgreicher Erstellung der Entscheidungsmatrix können MCDM-Methoden zur Entscheidungsunterstützung herangezogen werden. Wie bereits erwähnt wird für den ersten Versuch der Anwendung die Methode ANP vorgeschlagen. Nach erfolgter Anwendung von ANP ergeben sich für jedes Bauteil - z.B. Fenster, Türen, Tragkonstruktion, Anstriche, Bodenbeläge etc. - Reihungen, welche die Entscheidungsträgerpräferenzen am besten befriedigen.

Schritt 6: Planung des Gebäudes auf Basis der Ergebnisse

Im abschließenden Schritt des Prozessmodells wird der Input des Planers notwendig. Dieser Schritt gewährleistet die Planerfreiheit und unterstreicht, dass die Planertätigkeit nicht einfach durch Maschinen ersetzt werden kann. Mit den Rankings aller Bauteile kann der Planer bereits in die Detailplanung übergehen und die Kombinationen der vorgeschlagenen Bauteile zusammenfügen. Das Konzept des Prozessmodells kann in Kombination mit Planungstools eine Erweiterung von Building Information Modeling (BIM) darstellen.

7.3.2 Zukünftige Forschungsfragen

Im Laufe der Erstellung dieser Arbeit sind einige weitere Fragestellungen aufgetaucht, welche zukünftige Forschungsfragen darstellen.

- Sollten MCDM-Methoden bei der Ausschreibung und Vergabe eingesetzt werden?
- Kann durch eine Implementierung von MCDM-Methoden in Building Information Modeling die frühzeitige Planungsphase von Gebäuden erleichtert bzw. in ihrer Qualität gesteigert werden?

- Wie kann eine Integration (C++, Dynamo etc.) von MCDM-Methoden in Building Information Modeling umgesetzt werden?
- Ist der Einsatz von Künstlicher Intelligenz in Zusammenhang mit multikriteriellen Entscheidungsmethoden (Ableitung von Planungsfehlern aus abgeschlossenen Projekten und intelligentes Empfehlen anderer Lösungen) in der frühen Planungsphase von Gebäuden ein zukünftiger Ansatz für die Steigerung der Planungsqualität?

Literaturverzeichnis

- Abdel-malak, Fam F., Usama H. Issa, Yehia H. Miky, und Emad A. Osman. „Applying decision-making techniques to Civil Engineering Projects“. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences* 6, Nr. 4 (2017): 326–331. <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2017.05.004>.
- Aghajani Mir, M., P. Taherei Ghazvinei, N. M. N. Sulaiman, N. E. A. Basri, S. Saheri, N. Z. Mahmood, A. Jahan, R. A. Begum, und N. Aghamohammadi. „Application of TOPSIS and VIKOR improved versions in a multi criteria decision analysis to develop an optimized municipal solid waste management model“. *Journal of Environmental Management* 166 (2016): 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.09.028>.
- Akadiri, Peter O., und Paul O. Olomolaiye. „Development of sustainable assessment criteria for building materials selection“. *Engineering, Construction and Architectural Management* 19, Nr. 6 (11. Juni 2018): 666–687. <https://doi.org/10.1108/09699981211277568>.
- Akadiri, Peter O., Paul O. Olomolaiye, und Ezekiel A. Chinyio. „Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects“. *Automation in Construction* 30 (2013): 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.004>.
- APCC. „Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014“, 2014.
- Atkinson, R. „Project management: cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, it's time to accept other success criteria“. *International Journal Project Management*, 1999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000244](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000244).
- Austrian Standards. „ÖNORM EN 15643-1: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Teil 1: Allgemeine Rahmenbedingungen“, 1. November 2010.

- Austrian Standards. „ÖNORM EN 15643-2: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Teil 2: Rahmenbedingungen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität“, 15. April 2011.
- Austrian Standards. „ÖNORM EN 15643-3: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Teil 3: Rahmenbedingungen für die Bewertung der sozialen Qualität“, 15. März 2012.
- Austrian Standards. „ÖNORM EN 15643-4: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Teil 4: Rahmenbedingungen für die Bewertung der ökonomischen Qualität“, 15. März 2012.
- Austrian Standards. „ÖNORM EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen“, 2006.
- Austrian Standards. „ÖNORM EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen“, 1997.
- Ayağ, Zeki, und Özdemir, Rifat G. „An intelligent approach to ERP software selection through fuzzy ANP“. *International Journal of Production Research* 45, Nr. 10 (05/15 2007): 2169–2194. <https://doi.org/10.1080/00207540600724849>.
- Azapagic, Adisa, und Slobodan Perdan. *An integrated sustainability decision-support framework Part II: Problem analysis*. Bd. 12, 2005. <https://doi.org/10.1080/13504500509469623>.
- Azhar, Salman, Wade A. Carlton, Darren Olsen, und Irtishad Ahmad. „Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis“. *Building Information Modeling and Changing Construction Practices* 20, Nr. 2 (2011): 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.019>.
- Bana E Costa, C. „Les problématiques de l'aide à la décision: Vers l'enrichissement de la trilogie choix-tri-rangement“. *RAIRO - Operations Research*, 30 (2), 191-216, 1996.
- Barbier, Edward B. „The Concept of Sustainable Economic Development“. *Environmental Conservation* 14, Nr. 2 (1987): 101–10. <https://doi.org/DOI:10.1017/S0376892900011449>.
- Baumgartner, Rupert. „Integrierte Bewertung leistungswirtschaftlicher ökologischer und ökonomischer Aspekte unter Gesichtspunkten des Sustainable Development“. PhD Thesis, Institut für Wirtschafts- und Betriebswissenschaften der Montanuniversität Leoben, 2003.
- Behzadian, Majid, S. Khanmohammadi Otaghsara, Morteza Yazdani, und Joshua Ignatius. „A state-of the-art survey of TOPSIS applications“. *Expert Systems with Applications* 39, Nr. 17 (2012): 13051–13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>.

- Belton, Valerie. „A comparison of the analytic hierarchy process and a simple multi-attribute value function“. *Eur. J. Oper. Res.*, 1986.
- Belton, Valerie und Stewart, Theo *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*, 2002.
- Bradley, Robichaud Lauren, und Anantatmula Vittal S. „Greening Project Management Practices for Sustainable Construction“. *Journal of Management in Engineering* 27, Nr. 1 (11. Juni 2018): 48–57. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000030](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000030).
- Brans, Jean-Pierre und Bertrand Mareschal. *Chapter 5: PROMETHEE methods*, 2005.
- Bridgman, Percy, W. *Dimensional Analysis*, 1922.
- Buchholz, Thomas, Ewald Rametsteiner, Timothy A. Volk, und Valerie A. Luzadis. „Multi Criteria Analysis for bioenergy systems assessments“. *Energy Policy* 37, Nr. 2 (2009): 484–495. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.054>.
- Carlowitz, Hans C. von, und K. Irmer (Bearb.). *Sylvicultura Oeconomica: Anweisungen zur wilden Baum-Zucht*, 2000.
- Chang, G.-S., H.-L. Perng, und J.-N. Juang. „A review of systems engineering standards and processes“. *Journal of Biomechatronics Engineering* 1, 2008.
- Charnes, Abe, W W. Cooper, und R O. Ferguson. *Optimal Estimation of Executive Computing by Linear Programming*. Bd. 1, 1955. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1.2.138>.
- Cheng, J.C.P. und Ma, L.J. „A non-linear case-based reasoning approach for retrieval of similar cases and selection of target credits in LEED projects“. *Build. Environ.* 93 (2), 2015.
- Chiner, M. „Planning of expert systems for materials selection“. *Materials & Design* 9, Nr. 4 (1988): 195–203. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(88\)90031-3](https://doi.org/10.1016/0261-3069(88)90031-3).
- Clayton, B. Dalal und Bass, S. „Sustainable development strategies: A resource book“, 2002.
- Collins, Stefan Hajkowicz; Kerry. „A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management“, 2006.
- Commission (EC), European. „European Commission, COP 21“, 2015.
- Danesh, Darius, Mike Ryan, und Alireza Abbasi. *Multi-criteria Decision-making Methods for Project Portfolio Management: A Literature Review*. Bd. 16, 2017.
- David W. Miller, Martin K. Starr. *Executive Decisions and Operations Research*, 1960.
- Davies, A, D Gann, und T Douglas. „Innovation in megaprojects: systems integration at London Heathrow Terminal 5“, 2009.
- Defense Systems Management College (DSMC). *Systems Engineering Fundamentals*. 1999.

- Diakoulaki, D., und F. Karangelis. „Multi-criteria decision analysis and cost–benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, Nr. 4 (2007): 716–727. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.06.007>.
- Diaz-Maurin, François, und Mario Giampietro. „A “Grammar”for assessing the performance of power-supply systems: Comparing nuclear energy to fossil energy“. *Energy* 49 (2013): 162–177. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.11.014>.
- Dörner, Dietrich. *Die Logik des Misslingens - Strategisches Denken in komplexen Situationen*, 2003.
- Duckstein, Lucien, und Serafim Opricovic. *Multiobjective Optimization in River Basin Development*. Bd. 16, 1980. <https://doi.org/10.1029/WR016i001p00014>.
- Dyer, J.S., Fishburn, P.C., Steuer, R.E., Wallenius, J., Zionts, S. „Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: the next ten years“, 1992.
- Edwards, David, De-Graft Owusu-Manu, Gary Holt, und Andrea Ofori-Boadu. „Exploration of management practices for LEED projects: Lessons from successful green building contractors“. *Structural Survey* 30, Nr. 2 (11. Juni 2018): 145–162. <https://doi.org/10.1108/02630801211228743>.
- Eisner, H. *Essentials of Project and Systems Engineering Management*, 2008.
- Farag, M. M. „Quantitative methods of materials substitution: Application to automotive components“. *Materials & Design* 29, Nr. 2 (2008): 374–380. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.028>.
- Figuera, José, Roy, Bernard und Mousseau, Vincent. *Electre methods*, 2016.
- Foerster, Heinz von. *Cybernetics of Cybernetics*, 1973.
- Forrester, Jay W. *Industrial dynamics*, 1977.
- Geldermann, Jutta und Lerche, Nils „Leitfaden zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung“, 2014.
- Gershon, Mark und Duckstein Lucien. „Multiobjective Approaches to River Basin Planning“. *Journal of Water Resources Planning and Management* 109, Nr. 1 (11. Juni 2018): 13–28. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1983\)109:1\(13\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1983)109:1(13)).
- Gervásio, H., und L. Simões da Silva. „A probabilistic decision-making approach for the sustainable assessment of infrastructures“. *Expert Systems with Applications* 39, Nr. 8 (2012): 7121–7131. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.032>.

- Giannoulis, Christos, und Alessio Ishizaka. „A Web-based decision support system with ELECTRE III for a personalised ranking of British universities“. *New concepts, methodologies and algorithms for business education and research in the 21st century* 48, Nr. 3 (2010): 488–497. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2009.06.008>.
- Golden, Bruce L., Edward A. Wasil, und Patrick T. Harker. *The Analytic Hierarchy Process - Applications and Studies*, 1989.
- Gomez, P. *Modelle und Methoden des systemorientierten Managements: eine Einführung*, 1981.
- Govindan, Kannan, und Martin Brandt Jepsen. „ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications“. *European Journal of Operational Research* 250, Nr. 1 (2016).
- Graubner, C.-A., und T. Lützkendorf. „Bewertung und Zertifizierung der Nachhaltigkeit von Gebäuden“. *Mauerwerk* 12, 2008.
- Greco, Salvatore, Ehr Gott, Matthias und Figueirra, José R. „Multiple Criteria Decision Analysis – State of the Art Survey“. Springer-Verlag New York. 2016
- Greco, Salvatore, Benedetto Matarazzo, und Roman Słowiński. „Axiomatic characterization of a general utility function and its particular cases in terms of conjoint measurement and rough-set decision rules“. *Methodological Foundations of Multi-Criteria Decision Making* 158, Nr. 2 (2004): 271–292. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.06.004>.
- Greco, Salvatore, Benedetto Matarazzo, und Roman Slowinski. „Rough sets theory for multicriteria decision analysis“. *European Journal of Operational Research* 129, Nr. 1 (2001): 1–47. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00167-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00167-3).
- Grierson, Donald E. „Pareto multi-criteria decision making“. *Adv. Eng. Inform.* 22, Nr. 3 (2008): 371–84.
- Gultekin, Pelin, Mollaoglu-Korkmaz, Sinem, Riley, David und Leicht, Robert M. „Process indicators to track effectiveness of high-performance green building projects“. *J. Constr. Eng. Manage.* 139, 2013.
- Hafner, Annette. „Wechselwirkung Nachhaltigkeit und (Bau-)Qualität – Systemische Betrachtung des Zusammenspiels von Nachhaltigkeitsaspekten und Kriterien der (Bau-)Qualität im Sensitivitätsmodell und in der Analyse von beispielhaften Gebäuden“. PhD Thesis, Technische Universität München, 2011.
- Halford, Graeme S., Julie Mccredde, und John D. Bain. „How Many Variables Can Human Process“. *Psychological Science*, 2005.
- Helmut Laux, Heike Y. Schenk-Mathes, Robert M. Gillenkirch. *Entscheidungstheorie*, 2014.

- Hertwich, E.G., Hammitt, J.K. „A decision-analytic framework for impact assessment: Part 1: LCA and decision analysis“. *International Journal of Life Cycle Assessment* 6, 5e12., 2001.
- Herva, Marta, und Enrique Roca. „Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation“. *Journal of Cleaner Production* 39 (2013): 355–371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.058>.
- Higgins, JPT, und S(eds Green. *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions*. Bd. 2011, 2011.
- Hove, Sybille van den. „Between consensus and compromise: acknowledging the negotiation dimension in participatory approaches“. *Resolving Environmental Conflicts: Combining Participation and Multi-Criteria Analysis* 23, Nr. 1 (2006): 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2004.09.001>.
- Huang, Ivy B., Jeffrey Keisler, und Igor Linkov. „Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends“. *Science of The Total Environment* 409, Nr. 19 (2011): 3578–3594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.022>.
- Hwang, C.L., und K. Yoon. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag, 1981.
- Ibáñez-Forés, V., M. D. Bovea, und V. Pérez-Belis. „A holistic review of applied methodologies for assessing and selecting the optimal technological alternative from a sustainability perspective“. *Journal of Cleaner Production* 70 (2014): 259–281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.082>.
- IEC/ISO. „IEC62264-2-Enterprise-Control System Integration“, 2007 2004. *International Council on Systems Engineering (INCOSE)*, o. J.
- IPCC. „Climate Change 2014 - Mitigation of Climate Change“, 2014.
- „ISO 15392: Sustainability in building construction - General Principles“, 2008.
- Jacquet-Lagrange, E., und J. Siskos. „Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method“. *European Journal of Operational Research* 10, Nr. 2 (1982): 151–164. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(82\)90155-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(82)90155-2).
- Jacquet-Lagrange, Eric, und Yannis Siskos. *Preference disaggregation: 20 Years of MCDA experience*. Bd. 130, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00035-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00035-7).
- Jahan, A., M. Y. Ismail, S. M. Sapuan, und F. Mustapha. „Material screening and choosing methods –A review“. *Materials & Design* 31, Nr. 2 (2010): 696–705. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.013>.

- Jato-Espino, Daniel, Elena Catillo-Lopez, Jorge Rodriguez-Hernandez, und Juan Carlos Canteras-Jordana. „A review of application of multi-criteria decision making methods in construction“. *Automation in Construction*, 2014.
- John, Godfaurd, Derek Clements-Croome, und George Jeronimidis. „Sustainable building solutions: a review of lessons from the natural world“. *Building and Environment* 40, Nr. 3 (2005): 319–328. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.011>.
- Kahraman, Cengiz, İhsan Kaya, und Selcuk Cebi. „A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process“. *11th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction* 34, Nr. 10 (2009): 1603–1616. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.008>.
- Kang, Daekook, Wooseok Jang, und Yongtae Park. „Evaluation of e-commerce websites using fuzzy hierarchical TOPSIS based on E-S-QUAL“. *Applied Soft Computing* 42 (2016): 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.01.017>.
- Kant, Immanuel. „Kritik der reinen Vernunft“, 1979.
- Karst, Otto J. „Linear Curve Fitting Using Least Deviations“. *Journal of the American Statistical Association* 53, Nr. 281 (03/01 1958): 118–132. <https://doi.org/10.1080/01621459.1958.10501430>.
- Keeney, Ralph L. und Raiffa, Howard: „Decisions with multiple objectives: Preferences and Value Tradeoffs“. *Behavioral Science*, 1976.
- Keeney, Ralph L. „Value-focused thinking: A path to creative decision making“. *Cambridge: Harvard University Press.*, 1992.
- Keller, L. Robin. „Decision research with descriptive, normative, and prescriptive purposes —Some comments“. *Annals of Operations Research* 19, Nr. 1 (1989): 485–487. <https://doi.org/10.1007/BF02283536>.
- Khalili, Nasrin R., und Susanna Duecker. „Application of multi-criteria decision analysis in design of sustainable environmental management system framework“. *Cleaner Production: initiatives and challenges for a sustainable world* 47 (2013): 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.044>.
- Kiker Gregory A., Bridges Todd S, Varghese Arun, Seager Thomas P, und Linkov Igor. „Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making“. *Integrated Environmental Assessment and Management* 1, Nr. 2 (11. Juni 2018): 95–108. https://doi.org/10.1897/IEAM_2004a-015.1.

- Kim, Yeonjoo, und Eun-Sung Chung. „Assessing climate change vulnerability with group multi-criteria decision making approaches“. *Climatic Change* 121, Nr. 2 (2013): 301–315. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0879-0>.
- Kirchhof, Robert. *Ganzheitliches Komplexitätsmanagement*, 2003.
- Kirchmayr-Kreczi, Judith. „Systemisches Denken und Handeln - Grundlagen“, 2001.
- Kolbusa, Mathias. *Der Strategie-Scout*, 2013.
- Köne, Aylin Çiğdem, und Tayfun Büke. „An Analytical Network Process (ANP) evaluation of alternative fuels for electricity generation in Turkey“. *Energy Policy* 35, Nr. 10 (2007): 5220–5228. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.05.014>.
- Koopmans, T C. *Activity Analysis of Production and Allocation*, 1951.
- Korhonen, Pekka, Herbert Moskowitz, und Jyrki Wallenius. „Multiple criteria decision support - A review“. *European Journal of Operational Research* 63, Nr. 3 (1992): 361–375. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90155-3](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90155-3).
- Kreiner, Helmuth & Passer, Alexander. *Sustainable Design Process & Integrated Facades*. 2019.
- Kundakçı, Nilsen, und Ayşegül Tuş Işık. „Integration of MACBETH and COPRAS methods to select air compressor for a textile company“, 2016.
- Kurka, Thomas, und David Blackwood. „Selection of MCA methods to support decision making for renewable energy developments“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27 (2013): 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.001>.
- Kusumadewi, Sri. „Fuzzy Multi Attribute Decision Making“, 2006.
- Lambert, Johann Heinrich. „Systematologie“. *Philosophische Schriften Bd. VII*, 1969.
- Lantermann, Ernst - D., und Elke Döring-Seipel. *Probleme im Umgang mit komplexen Umwelten*, 200 n. Chr.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm. „Schriften zur Logik und zur philosophischen Grundlegung von Mathematik und Naturwissenschaft“. *Philosophische Schriften Band 4*, 1996.
- Luce, R. D., und D. von Winterfeldt. „What Common Ground Exists for Descriptive, Prescriptive, and Normative Utility Theories?“ *Management Science*, 1994.
- Ma, Jun, und Jack C. P. Cheng. „Data-driven study on the achievement of LEED credits using percentage of average score and association rule analysis“. *Building and Environment* 98 (2016): 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.005>.
- MacCrimmon, K. R. „An overview of multiple objective decision making“, 1973.
- Macharis, Cathy, und Annalia Bernardini. „Reviewing the use of Multi-Criteria Decision Analysis for the evaluation of transport projects: Time for a multi-actor approach“. *Transport Policy* 37 (2015): 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.11.002>.

- Magnus, Bengtsson. „Weighting in Practice: Implications for the Use of Life-Cycle Assessment in Decision Making“. *Journal of Industrial Ecology* 4, Nr. 4 (11. Juni 2018): 47–60. <https://doi.org/10.1162/10881980052541945>.
- Mahdevari, Satar, Kourosh Shahriar, und Akbar Esfahanipour. „Human health and safety risks management in underground coal mines using fuzzy TOPSIS“. *Science of The Total Environment* 488–489 (2014): 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.04.076>.
- Mandat M/350 DE - *Entwicklung horizontaler standardisierter Methoden für die Beurteilung der integrierten Umweltleistung von Gebäuden*. Kommission der Europäischen Gemeinschaft, 2004.
- Mardani, Abbas, Edmundas Kazimieras Zavadskas, Zainab Khalifah, Norhayati Zakuan, Ahmad Jusoh, Khalil Md Nor, und Masoumeh Khoshnoudi. „A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71 (2017): 216–256. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.053>.
- Martel, J., und B. Roy. „Analyse de la signifiante de diverses procedures d'agregation multicritere“, 2002.
- Marzouk, M. M. „ELECTRE III model for value engineering applications“. *Automation in Construction* 20, Nr. 5 (2011): 596–600. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.11.026>.
- Maydl, Peter. *Antrittsvorlesung*. Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, Technische Universität Graz, 2004.
- Meadows, D. L., und D.H. Meadows. *Die Grenzen des Wachstums*, 1972.
- Meckmann, Felix. *Nachhaltiges Bauen von Büroimmobilien*, 2014.
- Medineckiene, Milena, Zenonas Turskis, und Edmundas Kazimieras Zavadskas. „Sustainable construction taking into account the building impact on the environment“. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 18, Nr. 2 (06/01 2010): 118–127. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2010.14>.
- Meyer, Stephan. „Energieeffizienzsteigerung entlang der Supply Chain – Entscheidungsmodell zur wertschöpfungskettenorientierten Emissionsminderung in Transformationsländern“. PhD Thesis, Internationales Hochschulinstitut Zittau, 2011.
- Miller, George A. „The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information“. *The Psychological Review*, vol. 63, pp. 81-97, 1956.

- Moghaddam, N. Bagheri, M. Nasiri, und S. M. Mousavi. „An appropriate multiple criteria decision making method for solving electricity planning problems, addressing sustainability issue“. *International Journal of Environmental Science & Technology* 8, Nr. 3 (2011): 605–620. <https://doi.org/10.1007/BF03326246>.
- Morrissey, A. J, und J Browne. „Waste management models and their application to sustainable waste management“. *Landfill Process Modelling* 24, Nr. 3 (2004): 297–308. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2003.09.005>.
- Mulliner, Emma, Naglis Malys, und Vida Maliene. „Comparative analysis of MCDM methods for the assessment of sustainable housing affordability“. *Omega* 59 (2016): 146–156.
- Munda, G. „Multi criteria decision analysis and sustainable development“, 2005.
- Murat, H., S. & Coskun. „An application for measuring performance quality of schools by using the PROMETHEE multi An application for measuring performance quality of schools by using the PROMETHEE multi criteria decision making method“, 2015.
- NASA Systems Engineering Handbook*. NASA Headquarters, 2007.
- Neumann, J von, und O Morgenstern. „Theory of Games and Economic Behavior“. *Princeton University Press*, 1982.
- Okubo, Akira, und Simon A. Levin. *Diffusion and Ecological Problems: Modern Perspectives*, 2001.
- Omar, Attallah Sherif, Kandil Amr, Senouci Ahmed, und Al-Derham Hassan. „Multicriteria Decision-Making Methodology for Credit Selection in Building Sustainability Rating Systems“. *Journal of Architectural Engineering* 23, Nr. 2 (11. Juni 2018): 04017004.
- Opricovic, Serafim, und Gwo-Hshiung Tzeng. „Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS“. *European Journal of Operational Research* 156, Nr. 2 (2004): 445–455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1).
- Ozernoy, Vladimir M. „A Framework for Choosing the Most Appropriate Discrete Alternative Multiple Criteria Decision-Making Method in Decision Support Systems and Expert Systems“. In *Toward Interactive and Intelligent Decision Support Systems*, herausgegeben von Yoshikazu Sawaragi, Koichi Inoue, und Hirotaka Nakayama, 56–64. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1987.
- Papadopoulos, Agis, und Avraam Karagiannidis. „Application of the multi-criteria analysis method Electre III for the optimisation of decentralised energy systems“. *Omega* 36, Nr. 5 (2008): 766–776. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.01.004>.
- Parkan, Celik und Wu, Ming-Lu, „Comparison of three modern multicriteria decisionmaking tools“. *International Journal of Systems Science* 31, 2000.

- Passer, Alexander, Kreiner Helmuth, und Kainz Friedrich. „Gebäudebewertung im Kontext zu funktionalen und technischen Qualitäten aus der Perspektive der Nachhaltigkeit - Ein Diskussionsbeitrag - Teil 1“. *OIB aktuell 02*, 2009.
- Passer, Alexander. „Drei Fragen an ...“ *OIB aktuell 02*, 2016.
- Passer, Alexander. „Zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden“. PhD Thesis, TU Graz, 2010.
- Passer, Alexander, Helmuth Kreiner, Guido Cresnik, und Peter Maydl. „Genormte Nachhaltigkeit?“ *Enova2007*, 2007.
- Pfeifer, Günther. „Klimagerechte Architektur – Planung und Entwicklung nach dem kybernetischen Prinzip“. *Ingenieurbaukunst made in Germany*, 2010.
- Pohekar, S. D., und M. Ramachandran. „Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning–A review“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8, Nr. 4 (2004): 365–381.
- Rafiq, Yacub und Rustell, Michael „Building information modelling driven by the evolutionary computing“. *EG-ICE Workshop, University of Twente*, 2011.
- Rebai, Abdelwaheb. „BBTOPSIS: A bag based technique for order preference by similarity to ideal solution“. *Fuzzy Sets and Systems* 60, Nr. 2 (1993): 143–162. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(93\)90343-G](https://doi.org/10.1016/0165-0114(93)90343-G).
- Rebai, Abdelwaheb „Canonical fuzzy bags and bag fuzzy measures as a basis for MADM with mixed non cardinal data“. *European Journal of Operational Research* 78, Nr. 1 (1994): 34–48.
- Roberts, F. „Measurement Theory, with Applications to Decision Making, Utility and the Social Sciences“, 1979.
- Roghianian, E., J. Rahimi, und A. Ansari. „Comparison of first aggregation and last aggregation in fuzzy group TOPSIS“. *Applied Mathematical Modelling* 34, Nr. 12 (2010): 3754–3766. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.02.039>.
- Rowley, Hazel V., Gregory M. Peters, Sven Lundie, und Stephen J. Moore. „Aggregating sustainability indicators: Beyond the weighted sum“. *Journal of Environmental Management* 111 (2012): 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.05.004>.
- Roy, Bernard. „Classement et choix en présence de points de vue multiples: La méthode ELECTRE“. *R.I.R.O.*, 1968.
- Roy, Bernard. „The optimisation problem formulation: Criticism and overstepping“. *Operational Research Society*, 1981.
- Roy, Bernard. „The outranking approach and the foundations of electre methods“. *Theory and Decision* 31, Nr. 1 (1991): 49–73. <https://doi.org/10.1007/BF00134132>.

- Saaty, Thomas L. „A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures“. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 234 - 281, 1977.
- Saaty, Thomas L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, 1980.
- Sadok, Walid, Frédérique Angevin, Jacques-Éric Bergez, Christian Bockstaller, Bruno Colomb, Laurence Guichard, Raymond Reau, und Thierry Doré. „Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review“. *Agronomy for Sustainable Development* 28, Nr. 1 (2008): 163–174. <https://doi.org/10.1051/agro:2007043>.
- Sahaaya Arul Mary S. A., und Suganya Ganesan. *Multi-Criteria Decision Making Using ELECTRE*. Bd. 07, 2016. <https://doi.org/10.4236/cs.2016.76085>.
- Salminen, Pekka, Joonas Hokkanen, und Risto Lahdelma. „Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems“. *European Journal of Operational Research* 104, Nr. 3 (1998): 485–496. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00370-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00370-0).
- Šaparauskas, Jonas. „Multiple criteria evaluation of buildings with emphasis on sustainability“. *Journal of Civil Engineering and Management* 9, Nr. 4 (01/01 2003): 234–240. <https://doi.org/10.1080/13923730.2003.10531334>.
- Savage, L J. *The Foundations of Statistics*, 1954.
- Schalcher, H.R. *Systems Engineering*. Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich, 2008.
- Scherz, Marco. „Umsetzung nachhaltigen Bauens - eine empirische Situationsanalyse“. Master's Thesis, TU Graz, 2016.
- Schulz, Christoph. *Systemtheorie und Kybernetik als Grundlagen der Modellierung und des Controllings von Komplexität*, 2014.
- Sedlmeier, Ludwig. „Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Strategieimplementierung: Zwei Fallstudien zur Anwendung des Analytic Network Process im strategischen Controlling“.
- Şengül, Ümran, Miraç Eren, Seyedhadi Eslamian Shiraz, Volkan Gezder, und Ahmet Bilal Şengül. „Fuzzy TOPSIS method for ranking renewable energy supply systems in Turkey“. *Renewable Energy* 75 (2015): 617–625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.045>.
- Shaverdi, Meysam, Iman Ramezani, Reza Tahmasebi, und Ali Asghar Anvary Rostamy. „Combining Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS with Financial Ratios to Design a Novel Performance Evaluation Model“. *International Journal of Fuzzy Systems* 18, Nr. 2 (2016): 248–262. <https://doi.org/10.1007/s40815-016-0142-8>.

- Siskos, Yannis, Evangelos Grigoroudis, Nikolaos F. Matsatsinis, JosÉ Figueira, Salvatore Greco, und Matthias Ehrogott. „UTA Methods“. In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, 297–334. New York, NY: Springer New York, 2005. https://doi.org/10.1007/0-387-23081-5_8.
- Skibniewski, Mirosław J. und Chao Li-Chung. „Evaluation of Advanced Construction Technology with AHP Method“. *Journal of Construction Engineering and Management* 118, Nr. 3 (11. Juni 2018): 577–593. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1992\)118:3\(577\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1992)118:3(577)).
- Slowiński, R., S. Greco, und B. Matarazzo. „Axiomatization of utility, outranking and decision rule preference models for multiple-criteria classification problems under partial inconsistency with the dominance principle“. *Control and Cybernetics* 31, Nr. 4 (2002): 1005–1035.
- Soltani, Atousa, Kasun Hewage, Bahareh Reza, und Rehan Sadiq. „Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of Municipal Solid Waste Management: A review“. *Waste Management* 35 (2015): 318–328. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.010>.
- Stakhiv, B. J. Hobbs; V. Chankong; W. Hamadeh; E. „Does choice of multicriteria method matter? An experiment in water resources planning“. *Water Resources Research* 28, Nr. 7 (11. Juni 2018): 1767–1779. <https://doi.org/10.1029/92WR00712>.
- Sulochana, H.L. Madanayake, P. und Ruwanpura, J.Y. „Multi-criteria decision making to improve performance in construction projects with LEED certification“. *Construction Research Congress*, 2012.
- Tam, C, Thomas K. L. Tong, und YW Wong. *Selection of Concrete Pump Using the Superiority and Inferiority Ranking Method*. Bd. 130, 2004.
- Theodorou, Savvas, Georgios Florides, und Savvas Tassou. „The use of multiple criteria decision making methodologies for the promotion of RES through funding schemes in Cyprus, A review“. *Special Section: Carbon Reduction at Community Scale* 38, Nr. 12 (2010): 7783–7792. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.08.038>.
- Tomic, Miomir, Vojislav & Markovic, Danijel; Jovanovic. „Application of PROMETHEE Method on Decision Process in Mines“. *International Journal of Engineering*, 2013.
- Triantaphyllou, Evangelos., und Mann, S. H. „Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: Some challenges“. *International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice* 2, Nr. 1 (1995): 35–44.
- Triantaphyllou, Evangelos. *Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, 2000.

- Triantaphyllou, Evangelos, und Stuart H. Mann. „An examination of the effectiveness of multi-dimensional decision-making methods: A decision-making paradox“. *Decision Support Systems* 5, Nr. 3 (1989): 303–312. [https://doi.org/10.1016/0167-9236\(89\)90037-7](https://doi.org/10.1016/0167-9236(89)90037-7).
- Triantis, K, H. Rahmandad, und W Vaneman. „Systems Engineering: Have we lost our Competitive Edge? A Consideration of the Dynamics of Systems Engineering Projects“. *International System Dynamics Conference*, 2009.
- Trost, Markus. „Leistungswettbewerb in der Bauwirtschaft - Die Dimensionen einer Strategie des nicht preisbasierten Wettbewerbs“. PhD Thesis, Bauhausuniversität Weimar, 2006.
- Turcksin, L., A. Bernardini, und C. Macharis. „A combined AHP-PROMETHEE approach for selecting the most appropriate policy scenario to stimulate a clean vehicle fleet, 26th Mini-EURO conference on Intelligent Decision Making in Transportation/Logistics New Trends and Directions, Procedia - Soc“. *Behav. Sci.* 20 (2011): 945–965.
- Tuzkaya, U. R. „Evaluating the environmental effects of transportation modes using an integrated methodology and an application“. *International Journal of Environmental Science & Technology* 6, Nr. 2 (2009): 277–290. <https://doi.org/10.1007/BF03327632>.
- Tzeng, Gwo-Hshiung, Cw Lin, und Serafim Opricovic. *Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation*. Bd. 33, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.12.014>.
- Ulubeyli, Serdar, und Aynur Kazaz. „A multiple criteria decision-making approach to the selection of concrete pumps“. *Journal of Civil Engineering and Management* 15, Nr. 4 (01/01 2009): 369–376. <https://doi.org/10.3846/1392-3730.2009.15.369-376>.
- Upham, Paul, Simon Shackley, und Holly Waterman. „Public and stakeholder perceptions of 2030 bioenergy scenarios for the Yorkshire and Humber region“. *Energy Policy* 35, Nr. 9 (2007): 4403–4412. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.03.002>.
- Ustinovichius, L., E. K. Zavadskas, und V. Podvezko. „Application of a quantitative multiple criteria decision making (MCDM-1) approach to the analysis of investments in construction“. *Control and Cybernetics* Vol. 36, no 1 (2007).
- Vargas, Luis G. „An overview of the analytic hierarchy process and its applications“. *Decision making by the analytic hierarchy process: Theory and applications* 48, Nr. 1 (1990): 2–8.
- Vester, Frederic. *Die Kunst vernetzt zu denken*, 2008.
- Viteikienė, Milda, und Edmundas Zavadskas. *Evaluating the sustainability of Vilnius city residential areas*. Bd. 13, 2007. <https://doi.org/10.1080/13923730.2007.9636431>.
- Viyanchi, A., A. R. Ghatari, H. R. Rasekh, und H. Safikhani. „Administrative process and criteria ranking for drug entering health insurance list in Iran-TOPSIS-based consensus model“. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research* 15, Nr. 1 (2016): 369–381.

- Voogd, H. *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*. Pion, 1983.
<https://books.google.at/books?id=zuAOAAAAQAAJ>.
- Wallbaum, Holger. „Weltweite Bedeutung der Bauwirtschaft“. *Institut für Bauplanung und Baubetrieb, Professur für Nachhaltiges Bauen*, 2008.
- Wallenius, Jyrki, James S. Dyer, Peter C. Fishburn, Ralph E. Steuer, Stanley Zionts, und Kalyanmoy Deb. „Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: Recent Accomplishments and What Lies Ahead“. *Management Science* 54, Nr. 7 (11. Juni 2018): 1336–1349. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1070.0838>.
- Wang, Jiang-Jiang, You-Yin Jing, Chun-Fa Zhang, und Jun-Hong Zhao. „Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, Nr. 9 (2009): 2263–2278.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.021>.
- Wang, Xiaojun, und Hing Kai Chan. „A hierarchical fuzzy TOPSIS approach to assess improvement areas when implementing green supply chain initiatives“. *International Journal of Production Research* 51, Nr. 10 (05/01 2013): 3117–3130.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2012.754553>.
- Was ist Systems Engineering*, <https://www.oose.de/nuetzliches/was-ist-systems-engineering/>.
- Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. „Our Common Future“. 1987.
- Wiener, Norbert. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, 1948.
- Wiener, Norbert. *The Human Uses of Human Beings: Cybernetics and Society*, 1950.
- Wilms, F. *Systemorientiertes Management*, 2001.
- Wohlin, Claes. *Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>.
- Wölfling, Christian, und Ingo Treue. „Komplexitätsmanagement im Anlagenbau“, 2013.
- Wood, David A. „Supplier selection for development of petroleum industry facilities, applying multi-criteria decision making techniques including fuzzy and intuitionistic fuzzy TOPSIS with flexible entropy weighting“. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 28 (2016): 594–612..
- Xu, Xiaozhan. *The SIR Methods: A Superiority and Inferiority Ranking Method for Multiple Criteria Decision Making*. Bd. 131, 2001.
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00101-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00101-6).
- Yoe, C. „Trade-off analysis planning and procedures guidebook“, 2002.
- Yoon, C.-L., K. P., & Hwang. *Multiple attribute decision making: An introduction*, 1995.

- Yu, P. L. „A Class of Solutions for Group Decision Problems“. *Management Science* 19, Nr. 8 (1973): 936–946.
- Yue, Zhongliang. „A method for group decision-making based on determining weights of decision makers using TOPSIS“. *Applied Mathematical Modelling* 35, Nr. 4 (2011): 1926–1936. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.001>.
- Zanakis, Stelios H., Anthony Solomon, Nicole Wishart, und Sandipa Dublish. „Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods“. *European Journal of Operational Research* 107, Nr. 3 (1998): 507–529.
- Zavadskas, Edmundas, K., T. Vilutienė, Z. Turskis, und J. Šaparauskas. „Multi-criteria analysis of Projects' performance in construction“. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14, Nr. 1 (2014): 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.07.006>.
- Zavadskas, Edmundas, K., Arturas Kaklauskas, Zenonas Turskis, und Jolanta Tamosaitiene. *Contractor selection multi-attribute model applying COPRAS method with grey interval numbers*, 2008.
- Zavadskas, Edmundas, K., Arturas Kaklauskas, Zenonas Turskis, und Jolanta Tamosaitienė; „Multi-Attribute Decision-Making Model by Applying Grey Numbers“. *Informatica* 20, Nr. 2 (2009): 305–20.
- Zavadskas, Edmundas, K., Artūras Kaklauskas, Zenonas Turskis, und Jolanta Tamošaitiene. „Selection of the effective dwelling house walls by applying attributes values determined at intervals“. *Journal of Civil Engineering and Management* 14, Nr. 2 (01/01 2008): 85–93. <https://doi.org/10.3846/1392-3730.2008.14.3>.
- Zavadskas, Edmundas K., Zenonas Turskis, und Simona Kildienė. „State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods“. *Technological and Economic Development of Economy* 20, Nr. 1 (01/02 2014): 165–179. <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037>.
- Zavadskas, Edmundas, K., Zenonas Turskis, Jolanta Tamosaitiene, und Vukša Marina. *Selection of construction project managers by applying CORAS-G method*. Bd. 12, 2008.
- Zavadskas, Edmundas, K.; Mardani Abbas.; Turskis, Zenonas.; Jusoh, Ahmad.; Nor. „Development of TOPSIS Method to Solve Complicated Decision-Making Problems — An Overview on Developments from 2000 to 2015“. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 2016.
- Zavadskas, V., E. K.; Kaklauskas, A.; Sarka. „The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects“. *Technological and Economic Development of Economy* 1(3): 131–139., 1994.

Zeleny, Milan, und James L. Cochrane. *Multiple Criteria Decision Making*. Bd. 70, 1976.
<https://doi.org/10.2307/3150754>.

Zimmermann, Josef. *Kybernetik der Planungsprozesse*. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, Technischen Universität München, 2011.

Zopounidis, Constatntin, und Panos M Pardalos. *Handbook of Multicriteria Analysis*, 2010.

Züst, R. *Systems Engineering*, 1999.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Masterarbeit	25
2.1	CEN/TC 350 Ansatz	28
2.2	Die Bedeutung des Bausektors in Bezug auf eine nachhaltige Entwicklung	31
3.1	Auftrennen der Systemgrenzen	36
3.2	Verbindung von System Dynamics zu anderen Bereichen	39
3.3	Die Entwicklung des Systems Engineering	41
3.4	Unterschied zwischen einem komplizierten und komplexen System	43
3.5	Einfache, komplizierte und komplexe Systeme	44
4.1	Einteilung von MCDM-Methoden	59
5.1	Anzahl recherchierter Artikel im Zuge der systematischen Literaturrecherche der Methoden ohne Ausschlusskriterien	69
5.2	Übersicht systematische Literaturrecherche AHP	70
5.3	Übersicht systematische Literaturrecherche ANP	71
5.4	Übersicht systematische Literaturrecherche COPRAS	71
5.5	Übersicht systematische Literaturrecherche ELECTRE	72
5.6	Übersicht systematische Literaturrecherche MEW	73
5.7	Übersicht systematische Literaturrecherche PROMETHEE	74
5.8	Übersicht systematische Literaturrecherche SAW	75
5.9	Übersicht systematische Literaturrecherche SIR	76
5.10	Übersicht systematische Literaturrecherche TOPSIS	77
5.11	Übersicht systematische Literaturrecherche UTA	77
5.12	Übersicht systematische Literaturrecherche VIKOR)	78
5.13	Übersicht berücksichtigter Artikel nach Anwendung der systematischen Literaturrecherche nach den Ausschlussphasen	79
6.1	Vereinfachte Struktur des Analytic Hierarchy Process	82

6.2	Hierarchische Struktur des Entscheidungsproblems	83
6.3	Prioritäten in der Hierarchie	87
6.4	Hierarchieaufbau für AHP mit SuperDecision	89
6.5	Paarweise Vergleiche und Überprüfung des Konsistenzmaßes für Kriterien in SuperDecision	90
6.6	Lösung des Entscheidungsproblems mittels AHP in SuperDecision	91
6.7	Unterschiede einer linearen Hierarchie und einem nichtlinearen Netzwerk	93
6.8	Modellaufbau für ANP in SuperDecision	95
6.9	Exemplarische Darstellung einer Abhängigkeitsmatrix	96
6.10	Wechselwirkungen zwischen den Kriterien	97
6.11	Lösung des Entscheidungsproblems mit ANP in der Software SuperDecision	98
6.12	Präferenzfunktionen	115
6.13	Aufbau einer Präferenzfunktion (Typ 5)	116
6.14	Aufbau des Modells in der Software Diviz	135
6.15	Lösung des Entscheidungsproblems mit der Software Diviz	136
7.1	Unsicherheitsanalyse der Ergebnisse - Grafische Gegenüberstellung der Reihungen	148
7.2	Zukunftsfähiges datenbankbasiertes, systemisches und multikriterielles Prozess- modell	160

Tabellenverzeichnis

3.1 Einfluss der Fassade auf Nachhaltigkeitskriterien des Gebäudezertifizierungssystems DGNB/ÖGNI	49
3.2 Beispielhafte Entscheidungskriterien für die Planung einer nachhaltigen Gebäudehülle	54
3.3 Gewichtung der Kriterien	55
5.1 Schlüsselwörter der Literaturrecherche	68
6.1 9-Punkte-Skala für paarweise Vergleiche	84
6.2 Paarweise Vergleiche der Kriterien auf Basis der 9-Punkte-Skala	84
6.3 Normieren der Kriterienmatrix	85
6.4 RI-Werte nach Saaty	85
6.5 Konsistenzprüfung der Entscheidungsträgerpräferenzen	86
6.6 Paarweise Vergleiche, Konsistenzprüfung und Ermittlung der Alternativengewichtung	86
6.7 Lösung des Entscheidungsproblems mittels AHP	88
6.8 Normierung der Entscheidungsmatrix	101
6.9 Subjektive Gewichtung der Kriterien	101
6.10 Gewichtete und normierte Entscheidungsmatrix	101
6.11 Summenbildung der Maximierungs- und Minimierungskriterien	102
6.12 Lösung des Entscheidungsproblems mittels COPRAS	103
6.13 Berechnung der Normierungsparameter	106
6.14 Normierung der Entscheidungsmatrix	106
6.15 Subjektive Gewichtung der Kriterien	106
6.16 Gewichtung der Entscheidungsmatrix	106
6.17 Ermittlung des Übereinstimmungsmatrix (Concordance matrix)	107
6.18 Ermittlung des Uneinigkeitsmatrix (Discordance matrix)	107
6.19 Berechnung der Glaubwürdigkeitsmatrix (Credibility matrix)	108
6.20 Lösung des Entscheidungsproblems mittels ELECTRE	108
6.21 Entscheidungsmatrix	111

6.22 Subjektive Gewichtung der Kriterien	111
6.23 Gewichtung und Normierung der Entscheidungsmatrix	111
6.24 Lösung des Entscheidungsproblems mittels MEW	111
6.25 Entscheidungsmatrix	114
6.26 Paarweise Vergleiche zwischen Alternativen pro Kriterium	114
6.27 Subjektive Gewichtung der Kriterien	116
6.28 Berechnung der Präferenzen auf Basis der Präferenzfunktion Typ 5	117
6.29 Berechnung des Präferenzindex jeder Alternative	117
6.30 Lösung des Entscheidungsproblem mittels PROMETHEE	118
6.31 Entscheidungsmatrix	120
6.32 Normierung der Entscheidungsmatrix	121
6.33 Subjektive Gewichtung der Kriterien	121
6.34 Lösung des Entscheidungsproblems mittels SAW	121
6.35 Entscheidungsmatrix	123
6.36 S-Matrix	124
6.37 I-Matrix	124
6.38 Subjektive Gewichtung der Kriterien	124
6.39 Superiority und Inferiority-Ströme	125
6.40 Lösung des Entscheidungsproblems mittels SIR	125
6.41 Entscheidungsmatrix	128
6.42 Normierung der Entscheidungsmatrix	128
6.43 Subjektive Gewichtung der Kriterien	129
6.44 Gewichtung der normierten Entscheidungsmatrix	129
6.45 Ermittlung der positiven und negativen Ideallösungen	129
6.46 Lösung des Entscheidungsproblems mittels TOPSIS	130
6.47 Entscheidungsmatrix	133
6.48 Entscheidungsmatrix	139
6.49 MIN- und MAX-Werte der Kriterien	139
6.50 Subjektive Gewichtung der Kriterien	139
6.51 Normierung der Entscheidungsmatrix	140
6.52 Lösung des Entscheidungsproblems mittel VIKOR	140
6.53 Ausgewählte Literatur zur detaillierten Erläuterung einzelner Ablaufschritte der multikriteriellen Entscheidungsmethoden	142
7.1 Übersicht Methoden und deren Eigenschaften	144
7.2 Gegenüberstellung der Reihungen	147
7.3 Gegenüberstellung Methoden	149

7.4	Softwarelösungen für die ausgewählten MCDM Methoden	155
7.5	Softwarelösungen für die ausgewählten MCDM Methoden	156